

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

« ____ » _____ 2020 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»**

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Метод проектування архітектури мереж 5G на основі існуючих
LTE та LTE Advanced мереж»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ПІ-91мп

Свіржевська Ангеліна Іванівна _____

Керівник:

доцент кафедри ІТМ ІТС, доцент, к.т.н.

Правило Валерій Володимирович _____

Рецензент:

доцент кафедри ТК ІТС, доцент, к.т.н.

Явіся Валерій Сергійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Свіржевській Ангеліні Іванівні

1. Тема дисертації «Метод проектування архітектури мереж 5G на основі існуючих LTE та LTE Advanced мереж», науковий керівник дисертації доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж ІТС Правило Валерій Володимирович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «03» листопада 2020 р. № 3208-с
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2020 р.
3. Об'єкт дослідження: інтеграція мереж LTE та 5G.
4. Предмет дослідження: Метод проектування архітектури мереж 5G на основі існуючих LTE та LTE Advanced мереж
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Провести аналіз основних переваг 5G, проаналізувати актуальність такого переходу та розглянути проблеми, що виникають при розгортанні мереж 5G.
 2. Проаналізувати стек технологій та мережеву архітектуру LTE.

3. Дослідити різні варіанти інтеграції між LTE/5G, які були запропоновані, виділити їх переваги та недоліки.
 4. Дослідити можливість подвійного підключення в мережах LTE.
 5. Запропонувати метод інтеграції мережі 5G в існуючу архітектуру LTE.
 6. Проаналізувати запропонований метод.
 7. Розробити рекомендації щодо використання розробленого наукового підходу у якості готового продукту та виведення його на ринок шляхом розробки стартап-проекту.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу
7. Орієнтовний перелік публікацій:
1. Перспективи телекомунікацій 2019 – Основні проблеми впровадження мережі 5G, Свіржевська А. І.Правило В.В.
 2. Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем 2019 – Перспективи і складності впровадження 5G
 3. Перспективи телекомунікацій 2020 – Проблеми проектування приладів для мереж 5G міліметрового діапазону, Свіржевська А. І. В кн.: Перспективи телекомунікацій, Київ, 2020: матеріали. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020
9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження технології 5G та mmWave.		виконано
2	Проведення огляду стеку протоколів LTE		виконано
3	Дослідження різних варіантів інтеграції 5G/LTE		виконано
4	Дослідження технології подвійного підключення в мережах LTE		виконано
5	Розробка архітектури ядра для тісної взаємодії 5G/LTE		виконано
6	Проведення дослідження програмних можливостей, та реалізації різних модулів архітектури в симуляторі ns-3		виконано

7	Розробка моделі для проведення досліджень в симуляторі ns-3		виконано
8	Проведення імітаційного моделювання подвійного підключення в ns-3		виконано
9	Збір та аналіз результатів моделювання		
10	Розробка стартап-проекту на основі матеріалів роботи		
11	Підготовка звітної документації		

Студент

Ангеліна СВІРЖЕВСЬКА

Науковий керівник дисертації

Валерій ПРАВИЛО

РЕФЕРАТ

Робота містить 125 сторінок, 33 рисунки та 23 таблиці. Було використано 51 джерело.

Актуальність теми:

В сучасному світі дослідження технологій та мереж бездротового зв'язку є дуже важливим завданням. Кожна нова технологія вирішувала проблеми свого часу, і 5G не є виключенням. Очікується, що зв'язок MmWave буде відігравати важливу роль в п'ятому поколінні мобільних мереж. Вони пропонують потенційну пропускну здатність в кілька гігабіт і наднизьку затримку радіозв'язку, але в той же час страждають від високих ізотропних втрат в тракці передачі і зони покриття, набагато меншої, ніж у макросот LTE.

Найкращим варіантом, безумовно, є розгортання мережі з нуля. Проте цей варіант є довготривалою перспективою, тобто потребує багато часу для реалізації, а також великих інвестицій. Оскільки оператори зв'язку нещодавно доклали багато зусиль для розгортання мереж LTE, має сенс використовувати їх як частину нового покоління 5G. Зокрема, 4G може забезпечити кращий рівень покриття та зробити мережу 5G більш стійкою до відключень та меншою ймовірністю недоступності послуг. Тому оператори, в найближчий час, будуть шукати методи проектування нових мереж з використанням вже існуючого ресурсу, тобто LTE та LTE-Advanced.

Мета дослідження:

Ця робота спрямована на пошук методу проектування мереж 5G з використанням вже наявного у операторів зв'язку обладнання LTE та LTE-Advanced, щоб забезпечити плавний перехід до нової технології, а також підвищити надійність та продуктивність мережі 5G шляхом тісної і безперешкодної інтеграції з поточною мережею LTE.

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз основних переваг 5G, проаналізувати актуальність такого переходу та розглянути проблеми, що виникають при розгортанні мереж 5G.
2. Проаналізувати стек технологій та мережеву архітектуру LTE.
3. Дослідити різні варіанти інтеграції між LTE/5G, які були запропоновані, виділити їх переваги та недоліки.
4. Дослідити можливість подвійного підключення в мережах LTE.
5. Запропонувати метод інтеграції мережі 5G в існуючу архітектуру LTE.
6. Проаналізувати запропонований метод.
7. Розробити рекомендації щодо використання розробленого наукового підходу у якості готового продукту та виведення його на ринок шляхом розробки стартап-проекту.

Об'єкт дослідження: інтеграція мереж LTE та 5G.

Предмет дослідження: Метод проектування архітектури мереж 5G на основі існуючих LTE та LTE Advanced мереж.

Методи дослідження: основним методом дослідження є імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

У роботі представлено архітектуру тісної взаємодії для EPC та 5GC. Детально описано архітектуру подвійного підключення та реалізацію хендоверу між LTE та 5G. Запропонований метод розгортання мереж 5G дозволить використовувати мережі LTE в якості бази для мережі 5G, що дозволить підвищити надійність та продуктивність останньої, а також реалізувати можливість подвійного підключення.

Практичне значення одержаних результатів:

Результати дослідження дозволять розгорнути архітектуру мережі 5G використовуючи ресурс наявний в операторів зв'язку у вигляді мереж LTE та LTE Advanced, що збільшить надійність мереж новго покоління, а також реалізує тісну інтеграцію між LTE та 5G.

Публікації:

Результати магістерської дисертації опубліковано у 3 збірниках матеріалів конференцій.

Ключові слова: безпроводові мережі, 4G, 5G, архітектура LTE, архітектура NG-RAN, мережа радіодоступу, базова мережа.

ABSTRACT

The work contains 125 pages, 33 figures and 23 tables. 51 sources were used.

Relevance of the topic:

In today's world, research into wireless technologies and networks is a very important task. Each new technology has solved the problems of its time, and 5G is no exception. MmWave communication is expected to play an important role in the fifth generation of mobile networks. They offer potential bandwidth of several gigabits and ultra-low radio latency, but at the same time suffer from high isotropic losses in the transmission path and coverage area much smaller than in LTE macrocells.

The best option, of course, is to deploy the network from scratch. However, this option is a long-term prospect, ie it requires a lot of time to implement, as well as large investments. As telecom operators have recently put a lot of effort into deploying LTE networks, it makes sense to use them as part of a new generation of 5G. In particular, 4G can provide a better level of coverage and make the 5G network more resistant to outages and less likely to be unavailable. Therefore, operators, in the near future, will look for methods of designing new networks using existing resources, ie LTE and LTE-Advanced.

The purpose of study: This work aims to find a method for designing 5G networks using LTE and LTE-Advanced equipment already available to telecom operators to ensure a smooth transition to new technology, as well as to increase the reliability and performance of the 5G network through close and seamless integration with the current LTE network.

Research objectives:

1. Analyze the main benefits of 5G, analyze the relevance of such a transition and consider the problems that arise during the deployment of 5G networks.
2. Analyze the stack of technologies and LTE network architecture.

3. Investigate the various integration options between LTE / 5G that have been proposed, highlight their advantages and disadvantages.
4. Investigate the possibility of dual connection in LTE networks.
5. Propose a method of integrating the 5G network into the existing LTE architecture.
6. Analyze the proposed method.
7. Develop recommendations for using the developed scientific approach as a finished product and bringing it to market by developing a startup project.

Object of research: integration of LTE and 5G networks.

Subject of research: Method of designing 5G network architecture based on existing LTE and LTE Advanced networks.

Methods of research: the main methods of research are mathematical modeling and simulation.

Scientific novelty of the obtained results:

The paper presents a close interaction architecture for EPC and 5GC. The dual connection architecture and implementation of handover between LTE and 5G are described in detail. The proposed method of deployment of 5G networks will allow the use of LTE networks as a basis for the 5G network, which will increase the reliability and performance of the latter, as well as to implement the possibility of dual connection.

The practical value of the results obtained:

The results of the study will allow to deploy the architecture of the 5G network using the resource available to operators in the form of LTE and LTE Advanced networks, which will increase the reliability of next-generation networks, as well as implement close integration between LTE and 5G.

Publications:

The results of the master's dissertation are published in 3 conference proceedings.

Keywords: wireless networks, 4G, 5G, LTE architecture, NG-RAN architecture, Radio Access Network, Core Network.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ 5G	20
1.1. Фактори, що сприяють розвитку технологій 5G	20
1.2. Технологія mmWave та її впровадження в мережі 5g	23
Висновки до розділу.....	30
РОЗДІЛ 2. ОПИС АРХІТЕКТУРИ ІНТЕГРАЦІЇ LTE-5G	31
2.1. Стек протоколів та мережева архітектура LTE.....	31
2.2. Інтеграція LTE-5G.....	37
2.2.1. Різні варіанти архітектури для забезпечення тісної інтеграції	39
2.2.2. Подвійне підключення для мобільних мереж LTE	43
2.2.3. Хендовер в LTE	47
Висновки до розділу.....	50
РОЗДІЛ 3. ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G.....	51
3.1. Архітектура тісної взаємодії LTE-5G	51
3.1.1. Архітектура 5GS для взаємодії з EPS	52
3.1.2. Рішення проблем міграції, пов'язаних з доменом	54
3.2. Подвійне-підключення LTE-5G.....	63
3.2.1. Сигналізація управління.....	63
3.2.2. Реалізація подвійного підключення	66
3.2.3. Реалізація хендоверу.....	78

	12
3.2.4. Інтерфейс S1-AP і реалізація вузла MME	80
3.3. Моделювання та аналіз ефективності	81
3.3.1. Сценарій моделювання. Припущення симуляції.....	81
3.3.2. Основні результати	84
Висновки до розділу.....	99
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	100
4.1. Опис ідеї стартап-проекту	100
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	102
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	102
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	109
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	111
Висновки до розділу.....	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	117

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ABF	Analog Beamforming	Аналогове формування променя
AM	Acknowledged Mode	Підтверджений режим
AMC	Adaptive Modulation and Coding	Адаптивна модуляція та кодування
AoA	Angle of Arrival	Кут прийняття
AoD	Angle of Departure	Кут передачі
BLER	Block Error Rate	Блок помилок
BS	Base Stations	Базова станція
CB	Code Block	Блок коду
CDF	Cumulative Distribution Function	Функція кумулятивного розподілу
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier	Тимчасовий ідентифікатор стільникової радіомережі
CQI	Channel Quality Indicator	Індикатор якості каналу
CRT	Complete Report Table	Повна таблиця звітів
CSI	Channel Side Information	Інформація про канал
DBF	Digital Beamforming	Цифровий промінь
DC	Dual Connectivity	Подвійне підключення
DL	Downlink	Низхідна лінія зв'язку
DRB	Data Radio Bearer	Радіоносій даних
eNB	evolved Node Base	Вдосконалена база вузлів
EPC	Evolved Packet Core	Вдосконалене пакетне ядро
EPS	Evolved Packet System	Вдосконалена пакетна система
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer	Носій радіодоступу E-UTRAN
E-UTRAN	Evolved Universal	Вдосконалена

	Terrestrial Radio Access Network	універсальна наземна мережа радіодоступу
FDD	Frequency Division Duplexing	Дуплексне ділення частот
FS	Fast Switching	Швидке перемикання
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest	Гібридне автоматичне повторення запиту
HBF	Hybrid Beamforming	Гібридне формування променю
HH	Hard Handover	Жорсткий хендовер
IA	Initial Access	Початковий доступ
IMSI	International Mobile Subscriber Identity	Міжнародна ідентифікація абонента мобільного зв'язку
ITU	International Telecommunication Union	Міжнародний союз електрозв'язку
LOS	Line of Sight	Лінія зору
MAC	Medium Access Control	Середній контроль доступу
MCG	Master Cell Group	Група головних сот
MCS	Modulation and Coding Scheme	Схема модуляції та кодування
MeNB	Master eNB	Головна eNB
MIB	Master Information Block	Головний інформаційний блок
MICB	Mutual Information per Coded Bit	Взаємна інформація на кодований біт
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Кілька входів Кілька виходів
MME	Mobility Management Entity	Суб'єкт управління мобільністю
MMIB	Mean Mutual Information per coded Bit	Середня взаємна інформація на кодований біт

MTU	Maximum Transfer Unit	Максимальна одиниця передачі
NLOS	Non Line of Sight	Не лінія зору
NYU	New York University	Нью-Йоркський університет
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Мультиплексування з ортогональним поділом частот
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Ортогональний множинний доступ з розподілом частоти
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	Протокол конвергенції пакетних даних
PDU	Packet Data Unit	Блок пакетних даних
P-GW	Packet Gateway	Шлюз пакетів
PHY	Physical	Фізичний
QoE	Quality of Experience	Якість досвіду
RA	Random Access	Випадковий доступ
RAN	Radio Access Network	Мережа радіодоступу
RAT	Radio Access Technology	Технологія радіодоступу
RLC	Radio Link Control	Контроль радіозв'язку
RLF	Radio Link Failure	Помилка радіозв'язку
RMS	Root Mean-Squared	Корінь середньоквадратичний
RRC	Radio Resource Control	Контроль радіоресурсів
RT	Report Table	Таблиця звітів
SCG	Secondary Cell Group	Вторинна група сот
SDN	Software Defined Networking	Програмно-визначена мережа
SDU	Service Data Unit	Блок обслуговування даних
SeNB	Secondary eNB	Вторинний eNB
S-GW	Service Gateway	Сервісний шлюз

SI	System Information	Інформація про систему
SIB	System Information Block	Блок системної інформації
SRB	Signalling Radio Bearer	Радіоносій сигналізації
TB	Transport Block	Транспортний блок
TDD	Time Division Duplexing	Дуплекс часового поділу
TDMA	Time Division Multiple Access	Множинний доступ з розподілом часу
TM	Transparent Mode	Прозорий режим
UE	User Equipment	Обладнання користувача
UL	Uplink	Висхідна лінія зв'язку
ULA	Uniform Linear Array	Рівномірний лінійний масив
UM	Unacknowledged Mode	Невідомий режим
RA	Random Access	Випадковий доступ

ВСТУП

Мобільна мережа наступного покоління (5G) буде розгорнута вже скоро, що обумовлено збільшенням попиту на мобільний трафік і безліччю варіантів використання, які не можуть бути задоволені поточними мережами LTE. Згідно з останнім звітом Ericsson Mobility Report [1], очікується, що трафік смартфонів в мобільних мережах виросте в 12 разів до 2021 року. Як показано на рис. 1.1, щомісячний трафік на один смартфон в Європі і США буде більше 15. ГБ.

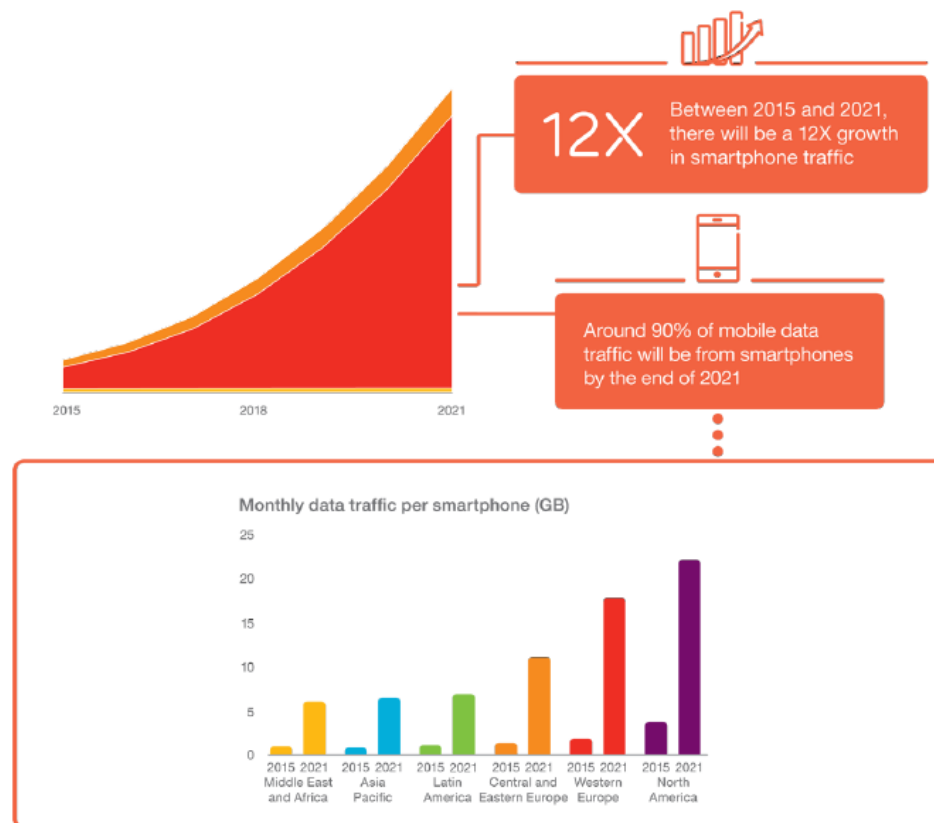


Рис. 1.1 Звіт Ericsson Mobility Report: прогноз по мобільному трафіку

Мережа 5G необхідна для задоволення цих вимог до трафіку, зростання кількості підключених пристроїв і визначення нових бізнес-моделей для операторів мереж. Вона буде розроблена з урахуванням цілісного підходу з урахуванням різних варіантів використання, щоб забезпечити оптимізований

підхід для кожного з них. Згідно з рекомендаціями [14], мережі 5G повинні підтримувати:

- швидкість на межі соти 50 Мбіт/с або більше і, як правило, пропускна здатність соти вище 1 Гбіт/с для підтримки потокового відтворення відео 4K і великої кількості підключених користувачів;
- наднизьку наскрізну затримку, переважно менше 10 мс, з більш суворою вимогою до затримки в 1 мс для конкретних додатків (тактильний Інтернет, віддалене промислове управління);
- надвисока доступність послуг з високою надійністю і постійною взаємодією з користувачем в мережі;
- масове розгортання пристроїв зв'язку машинного типу (МТС), які повинні бути енергоефективними і споживати дуже мало енергії.

В останні роки дослідження 5G стали гарячою темою в області телекомунікацій. Насправді є кілька проблем, які необхідно вирішити, щоб задовольнити ці вимоги. Наприклад, низька затримка може потребувати перепроєктування базової мережі. Масове розгортання МТС потребують дешевої електроніки і простих мережевих процедур.

Однак головне завдання - досягти надвисокої пропускної здатності. Одним з можливих факторів є використання частот міліметрового діапазону. Дійсно, спектр на більш низьких частотах мікрохвиль дуже фрагментований, і виділення великих ділянок спектра (для отримання великої доступної смуги пропускання) є неможливим. Навпаки, в міліметровому діапазоні є шанс виділити гігагерцову смугу пропускання операторам мережі [15].

Однак при використанні несучих частот вище 10 ГГц з'являється низка проблем:

- високі ізотропні втрати в тракті;
- блокування від будівель, а також від людського тіла;

- затухання через листя і сильний дощ[3].

Таким чином, канали mmWave можуть забезпечувати дуже високу пропускну здатність, але їх якість варіюється. Зокрема, для користувача устаткування (UE) може відчуватися збій, або SINR може бути занадто низьким для зв'язку з розвиненою вузловою базою mmWave (eNB). Можливе рішення - використовувати мережу LTE, яка працює на частотах мікрохвиль, як запасний варіант. В сучасних мобільних мережах звичайна процедура, яка використовується для відкоту, - це передача обслуговування (хендовер). Однак звичайна процедура LTE може бути занадто повільною, і може бути інтервал, протягом якого стільниковий зв'язок буде недоступним.

У цій роботі досліджується інтеграція між мережами LTE і 5G , а також альтернатива стандартної передачі обслуговування (хендоверу). В інтегрованій системі UE знаходиться в стані підключення як до LTE, так і до eNB mmWave. Тому це називається установкою з подвійним підключенням. Ця система буде проаналізована на предмет використання швидкого перемикавання, тобто тільки один з двох вузлів eNB обслуговуватиме дані в UE, але можна буде переключитися з однієї технології радіодоступу (RAT) на іншу за допомогою одного керуючого повідомлення без участі базової мережі.

Дослідження 5G ґрунтуються на прогнозах, які передбачають зростання мобільного інтернет-трафіку (як людського, так і машинного). Існує безліч технологій, які були визначені в якості допоміжних в декількох документах, в яких пропонуються керівні принципи і напрями досліджень для мереж 5G.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ 5G

1.1. Фактори, що сприяють розвитку технологій 5G

Амбітні цілі, на яких базується проектування мережі 5G, вимагають як еволюції поточного радіодоступу та базової мережі LTE 4G, так і нових проривних технологій. Такі проблеми, як збільшення ємності в 1000 разів, збільшення швидкості передачі даних в 100 разів, затримка менше 10 мс [19], поряд зі стійкими витратами і постійною якістю взаємодії (QoE), можна вирішити тільки за допомогою комбінації різних рішень, на основі новаторських технологій і удосконалень надійних і відомих систем. Зокрема, автори огляду в [20] перераховують в якості потенційних чинників, що сприяють використанню частот міліметрового діапазону, масивний множинний вхід і множинний вихід (MIMO), інтелектуальні інфраструктури і вбудовану підтримку для різних варіантів використання (мобільний ширококутовий доступ, масивний M2M, наднизька затримка). Інші статті автори яких згодні з цією точкою зору також додають поділ рівня управління і користувача, як в програмно-визначених мережах (SDN) [2], повнодуплексні радіо [21] і гетерогенні мережі. На рис. 1.2 показаний повний набір потенційних чинників і детально описана їх роль по відношенню до всієї системи.

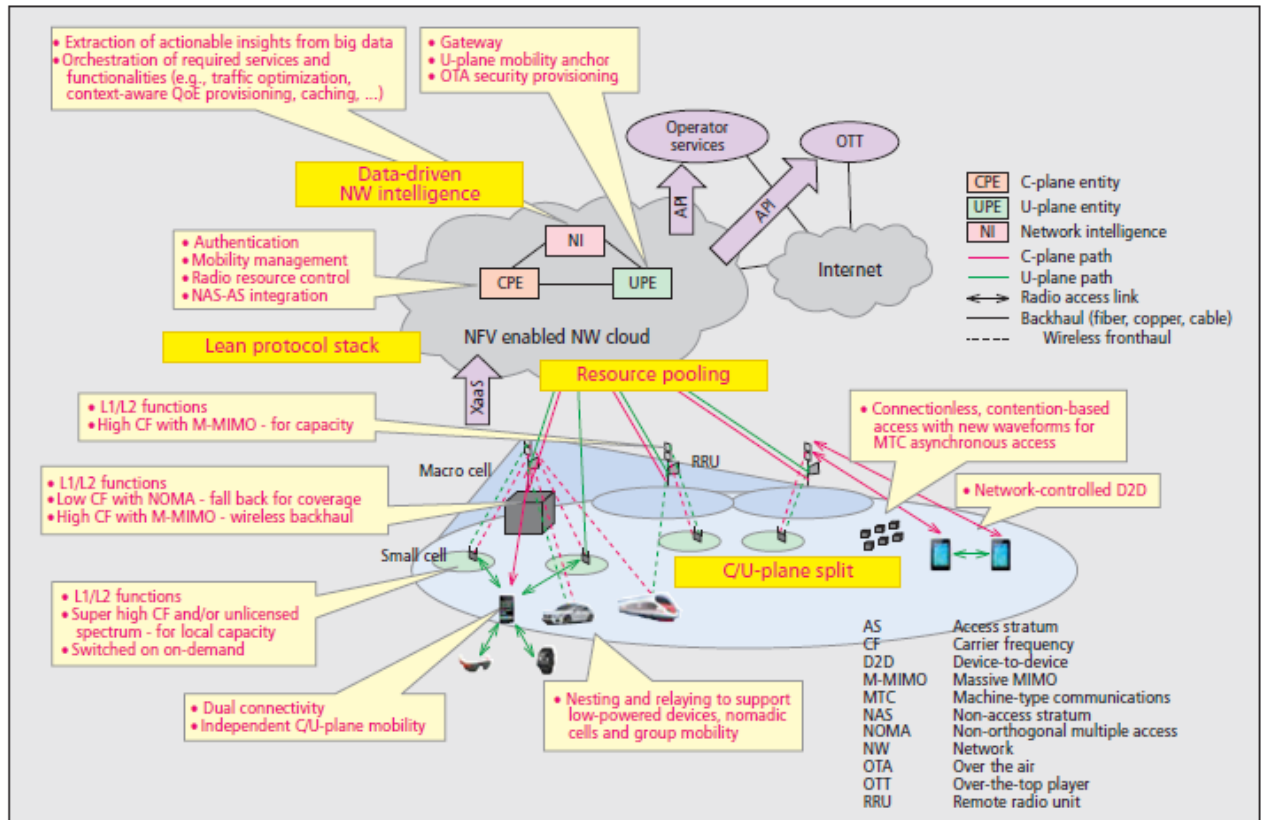


Рис. 1.2 Бачення мобільної мережі 5G і потенційні можливості для впровадження технологій

Тому опишемо, як деякі з цих технологій можуть сприяти розвитку мереж 5G:

- Частоти міліметрового діапазону можуть пропонувати великі ділянки вільного невикористаного спектра, які можуть бути виділені операторам зв'язку. На цих частотах поширення є затрудненим, але, за винятком чутливості до засмічення, умови дуже схожі на мікрохвилі;

- Гетерогенні мережі дозволяють збільшити пропускну здатність мережі радіодоступу за рахунок невеликих сот (відомих як пікосоти і фемтосоти), розгорнутих щільніше, але з меншою зоною покриття і меншою потужністю передачі. Для цих сот необхідний рівень покриття, що забезпечується застарілими макростільниками 4G або сотами 5G, що працюють на частотах

мікрохвиль, щоб уникнути перебоїв в обслуговуванні. В рамках пропозиції HetNet використання поділу площин U/C означає, що функціональні можливості призначеної для користувача площини можуть бути надані малими сотами mmWave 5G, в той час як повідомлення рівня управління відправляються з використанням рівня покриття, що дозволяє підвищити надійність з'єднання;

- Massive MIMO відноситься до використання системи, в якій кількість антен на базовій станції (BS) набагато більше, ніж кількість пристроїв на ресурс сигналізації [22]. Працюючи в міліметровому діапазоні частот, можна упакувати менші антени всередині UE або в BS. З масивним MIMO можна отримати дуже вузькі промені, що дозволяє використовувати просторове мультиплексування і збільшувати пропускну здатність. Основним обмеженням є необхідність своєчасної оцінки каналу для відстеження мобільності користувача, проте, як згадувалося в [2], можна використовувати рішення з подвійним підключенням для забезпечення негайного переходу до іншого каналу зв'язку, мета якого - забезпечити постійне покриття;

- Очікується, що підтримка різних варіантів використання буде розширена за рахунок використання: а) настроюваної схеми кадру на фізичному (PHY) рівні і рівні управління доступом до середовища передачі (MAC) на основі мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) або одного з його варіантів; б) адаптивної базової мережі, яка може відповідати вимогам QoS для кожного потоку даних. Ця пропозиція є частиною підходу, спрямованого на гармонізацію технології радіодоступу мереж 5G з поточними RAT на основі LTE і Wi-Fi OFDM [23];

- Повнодуплексна радіотехнологія була ретельно вивчена в останні роки і може бути реалізована за допомогою методів приглушення власних перешкод завдяки підвищеній обчислювальній потужності, доступній як на мобільних

терміналах, так і на базових станціях. Її можна використовувати або в мережі радіодоступу, або для транзитних з'єднань між базовими станціями [24];

- Інтелектуальні інфраструктури є ключем до повного використання нових можливостей і підвищення продуктивності, що надається іншими факторами. Інтелектуальна інфраструктура означає використання кешування на кордоні мережі, базової мережі, яку можна реконфігурувати і яка здатна обслуговувати користувачів з різними вимогами, з SDN та економічним дизайном. Ще одна пропозиція - розрізання мережі (network slicing), тобто різні функції мережі пропонуються різними постачальниками послуг, які взаємодіють один з одним [25]. Інтелектуальна інфраструктура також може запропонувати операторам зв'язку різні можливості для бізнесу.

1.2. Технологія mmWave та її впровадження в мережі 5g

Як згадувалося вище, впровадження зв'язку на частотах міліметрового діапазону в мережах 5G розглядається як спосіб досягнення цілей по пропускній здатності і збільшення потужності. Частоти міліметрових хвиль - це ті, які знаходяться в діапазоні 3-300 ГГц, де довжина хвилі дійсно знаходиться в діапазоні 1-100 мм. В основному вони не ліцензовані або ліцензовані слабо [26], і Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) визначить, які смуги частот є найбільш підходящими для мереж радіодоступу 5G. Рис. 1.3 відразу показує, чому ці системи залучають дослідників в області електрозв'язку: потенційний спектр, який може бути виділений системам 5G, дуже великий. Потенційні несучі частоти, досліджені групою з Нью-Йоркського університету, складають 28 ГГц і 73 ГГц [4].

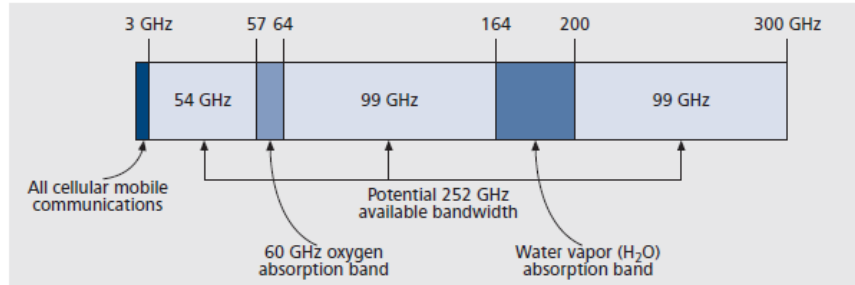


Рис. 1.3 Спектр в діапазоні [0, 300] ГГц

Використання таких високих частот дає кілька переваг, а також деякі недоліки. Основні плюси:

- дуже велика доступна пропускна здатність;
- можливість упаковки більшої кількості антен в мобільний термінал в порівнянні з тими, які дозволяє мікрохвильова система;
- покращене відповідне споживання енергії по відношенню до більш низьких частот [7], тобто потужність, що витрачається на передачу кожного біта, нижче для міліметрових хвиль, ніж для типових діапазонів LTE;
- можливість використання дуже вузьких променів для обмеження перешкод для інших базових станцій і кінцевих пристроїв, а також для поліпшення покриття.

Серед основних мінусів:

- обмеження в зоні покриття, особливо в міських умовах, де сигнали міліметрового діапазону страждають від блокування;
- абсолютна споживана потужність.

Поширення mmWave радіо

Вимірювання поширення міліметрового діапазону на відкритому повітрі проводилися тільки в останні роки, в той час як внутрішня будова широко висвітлювалася з 1980-х років [27], а використання міліметрового діапазону для внутрішнього зв'язку вже є частиною стандарту [28]. В [3] автори пропонують

використовувати частоти міліметрового діапазону в мобільних мережах; Незабаром пішли зовнішні вимірювання, основні попередні результати яких представлені в [4, 26].

Деякі загальні міркування можна зробити щодо поширення частот міліметрового діапазону:

- Хоча втрати при всеспрямованому поширенні підкоряються закону Фріїса і збільшуються пропорційно квадрату частоти, при розгляді бюджету лінії міліметрового діапазону також необхідно враховувати посилення антени. При тій же площі апертури антени коефіцієнт підсилення збільшується зі збільшенням частоти. Отже, цей коефіцієнт компенсує втрати на вільному шляху в бюджеті лінії зв'язку. Більш того, за допомогою mmWave можна створити більше спрямованих антен в невеликому просторі, що дозволяє отримати високий коефіцієнт формування променя за умови, що промінь може відстежувати мобільний термінал [15];

- Основна проблема для частот міліметрового діапазону - затухання. Такі матеріали, як цегла, демонструють коефіцієнт затухання в діапазоні 40-80 дБ, а людське тіло може послаблювати сигнали міліметрових хвиль до 35 дБ [15]. Однак більш високе відображення полегшує зв'язок поза зоною прямої видимості.

- Крім того, навіть дощ послаблює сигнали міліметрового діапазону, оскільки довжина хвилі порівнянна з розміром краплі дощу, що викликає розсіювання радіосигналу. Ослаблення через дощ вимірюється в дБ/км і сильно залежить від інтенсивності дощу в мм/год. У разі невеликого дощу (2,5 мм/год) затухання невелике (1 дБ/км), зокрема, з урахуванням очікуваного типового максимального діапазону комірок міліметрового діапазону (200 м). Однак можуть бути особливі випадки (наприклад, мусони), коли зв'язок в міліметрових хвилях може бути порушений дуже сильним дощем [3].

Вимірювання [4] підтверджують ці загальні міркування. Вони були виконані в Нью-Йорку з використанням високонаправлених антен на частотах 28 ГГц і 73 ГГц. З рис 1.4 видно, що закон Фріїса (лінія вільного простору) відповідає вимірам для випадку прямої видимості (LOS), в той час як сценарій без прямої видимості (NLOS) демонструє лінійну поведінку на відстані, з додатковим ослабленням на 20 дБ по відношенню до випадку LOS. Максимальна відстань, розглянута на рисунку, становить 200 м, оскільки на більшій відстані сигнал не вимірюється (при зміні потужності передачі від 15 до 30 дБм). Цей випадок розглядається як збій, тобто мобільний термінал не може прийняти сигнал від базової станції. Ця відстань є фактичною межею радіусу малих сот міліметрового діапазону, які повинні бути щільно розгорнуті для забезпечення рівномірного покриття.

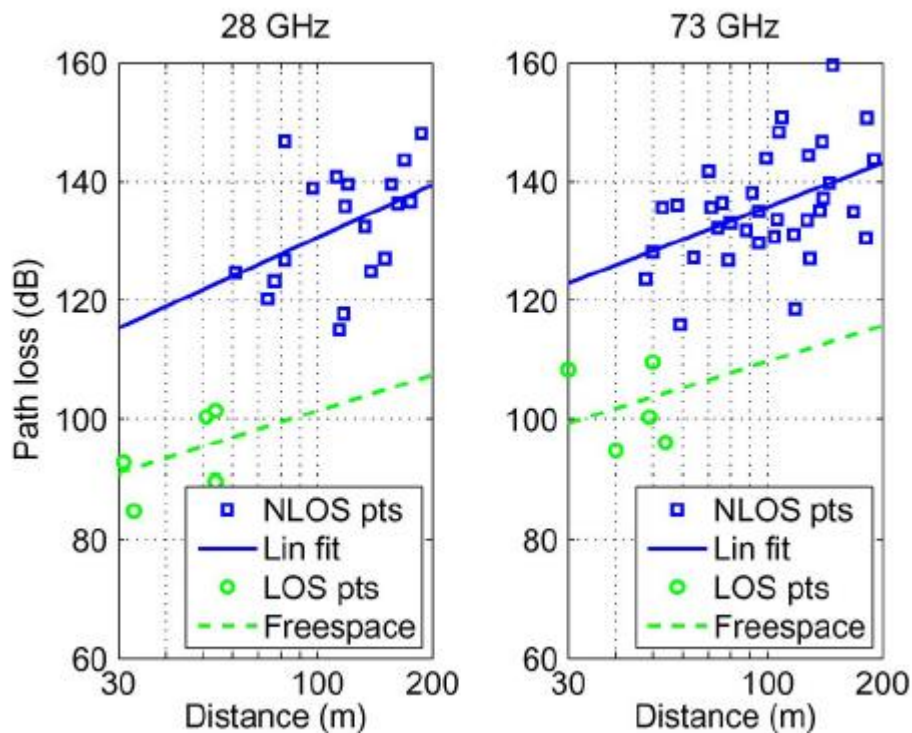


Рис. 1.4 Втрати в тракті для частот 28 ГГц і 73 ГГц

Спрямована передача mmWave

Як згадувалося вище, високі втрати ізотропного поширення можуть бути компенсовані спрямованими антенами з високим коефіцієнтом посилення формування променя. Це, однак, визначає іншу проблему: спрямованість для UE має відстежуватися і враховуватися в eNB [15].

Більш того, високонаправлені передачі створюють проблеми для ширококомовних сигналів і синхронізації для початкового пошуку стільників. Як пояснюється в [29], існує компроміс спрямованості. При всенаправленому зв'язку діапазон, який може покрити кожен eNB mmWave, обмежений, але, в той же час, всі пристрої, що знаходяться в зоні дії, можуть приймати трансляцію інформації. З іншого боку, напів- або високонаправлене рішення дозволяють збільшити дальність передачі і зменшити перешкоди, але тоді при доступі до мережі необхідний просторовий пошук. Крім того, якщо ширококомовні передачі є всеспрямованими, а передача даних замість цього є спрямованою, може бути невідповідність між областю, в якій може прийматися інформація про синхронізацію і управління ширококомовної передачею, і областю, в якій підтримуються передачі даних, як показано в [30]. Спрямована процедура для початкового доступу (IA), з іншого боку, може вносити додаткові затримки [15]. Проблеми затримки і покриття для IA оцінюються в [31], а в [32] оцінюється продуктивність різних рішень, що дозволяють уникнути жадібного просторового пошуку.

Споживання потужності mmWave

Ще одна проблема, яку необхідно вирішити при розгляді зв'язку з використанням технології mmWave і дуже високою використовуваною смугою пропускання - це енергоспоживання. У сучасних стільникових мережах, як показано на рис. 1.5, споживання енергії базовими станціями складає майже 60% рахунку за електроенергію типового оператора зв'язку. Оскільки

очікується, що кількість розгорнутих осередків збільшиться з урахуванням меншого покриття частот міліметрового діапазону [15], необхідно прийняти енергоефективний підхід при проектуванні і плануванні мереж 5G.

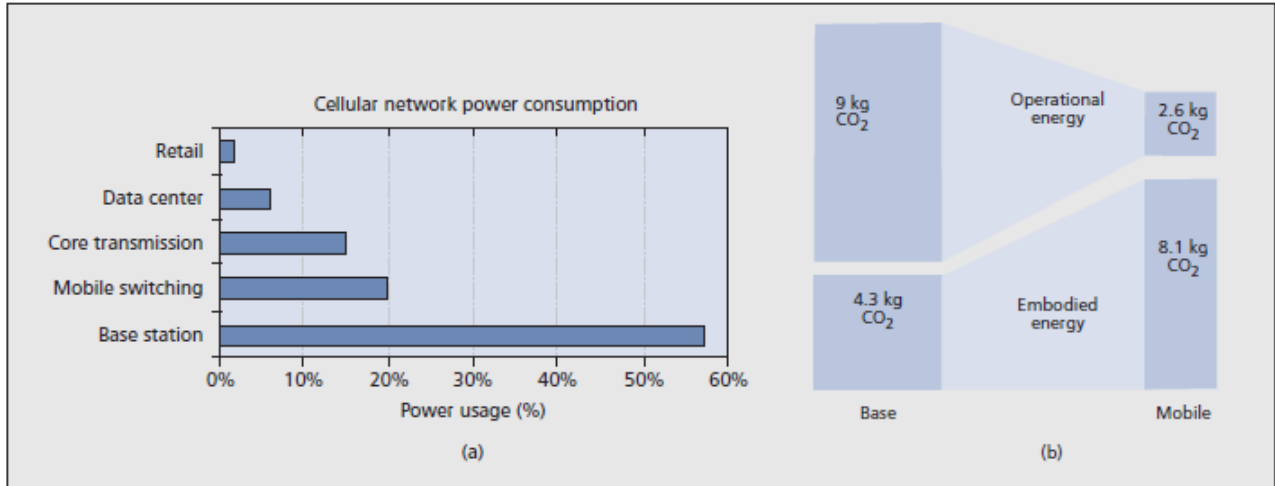


Рис. 1.5 Типове енергоспоживання в поточній мобільній мережі

Особливу увагу слід приділити конструкції аналого-цифрових перетворювачів і блоків обробки. Дійсно, енергоспоживання аналого-цифрового перетворювача лінійно залежить від розглянутої швидкості. Наприклад, сучасна схема, що працює на швидкості 100 Мс / с [33], може потребувати до 250 мВт при роботі, що викликає занадто високе споживання енергії в мобільних терміналах міліметрового діапазону [15]. Очікується, що рішення з цифровим формуванням діаграми спрямованості (DBF), в яких використовуються два аналого-цифрових перетворювача для кожної антени, будуть мати більш високе енергоспоживання, ніж системи з гібридним формуванням діаграми спрямованості (HBF), в яких використовується менша кількість аналого-цифрових перетворювачів, ціною меншої гнучкості. Однак в [6] оцінюється ефективність різних схем формування діаграми спрямованості з точки зору споживаної потужності P_{tot} . Зокрема, автори розглядають всі елементи в приймачі міліметрових хвиль, тобто не тільки аналого-цифрові перетворювачі,

але також комбайнери, змішувачі, малопотужні підсилювачі, різні смуги пропускання B і кількість біт b для аналого-цифрового перетворення. Як показано на рис. 1.6, існують деякі значення b , для яких споживана потужність приймача з DBF менше, ніж у приймача з HBF. Замість цього аналогове формування променя (ABF) завжди має найменше енергоспоживання при однаковій кількості використовуваних антен.

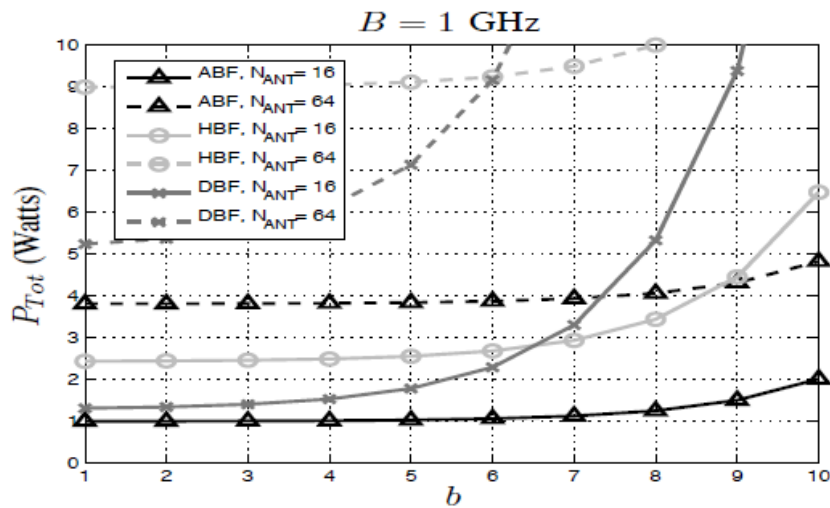


Рис. 1.6 P_{tot} для $B = 1$ ГГц, різні схеми формування променя і кількість антен N_{ANT}

Енергоспоживання систем міліметрового діапазону було вивчено по відношенню до досяжної швидкості в [7], щоб зрозуміти, чи впливають умови LOS або NLOS на енергоспоживання і яку смугу пропускання слід виділити в двох різних сценаріях. . Зокрема, коефіцієнт споживання (CF) визначається як:

$$CF = \frac{R_{max}}{R_{consumed,min}} \quad (1.1)$$

де R_{max} - максимальна швидкість, досяжна для даної системи зв'язку, і може бути обчислена з використанням теорії Шеннона, а $P_{consumed,min}$ - споживана потужність. На рис. 1.7 показано порівняння CF, яке може бути отримано системою з пропускнуою здатністю 10 МГц і 400 МГц для різних втрат на тракті.

Можна бачити, що при налаштуванні LOS з точки зору CF краще використовувати велику смугу пропускання, в той час як в NLOS (вищі втрати в тракті) менша смуга пропускання більш ефективна.

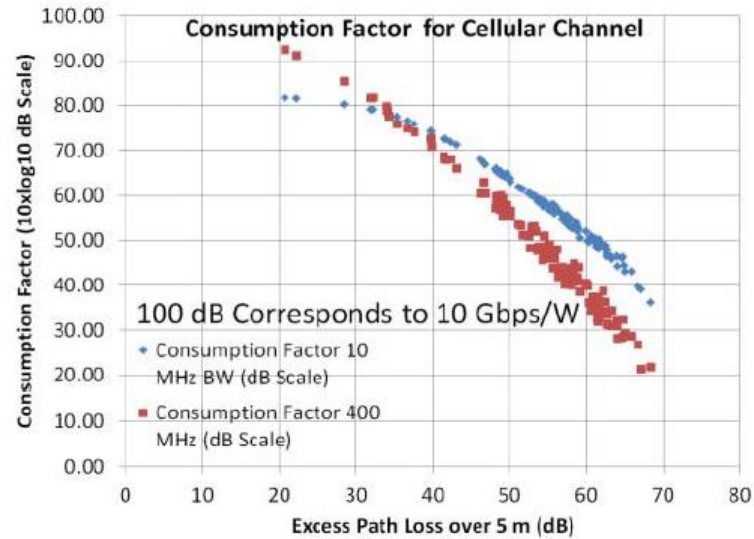


Рис. 1.7 CF для системи 38 ГГц з пропускнуою здатністю $B = 10$ МГц або $B = 400$ МГц

Висновки

1. Досліджено причини та передумови появи мереж нового покоління, з огляду на нові виникаючі потреби, можливості, які пропонують нові мережі та проблеми минулих поколінь.

2. Розглянуто технології та фактори, які повпливали на розвиток 5G. Описано, що кожна з них являє собою, та які переваги вона надає.

3. Проведено огляд технології mmWave, проблем та складнощів які виникають при її впровадженні, а також можливі варіанти вирішення цих проблем.

РОЗДІЛ 2

ОПИС АРХІТЕКТУРИ ІНТЕГРАЦІЇ LTE-5G

Як видно з попереднього розділу, наступне покоління мобільних мереж буде поєднанням еволюції застарілих мереж 4G та нових проривних технологій. Однак, оскільки оператори зв'язку нещодавно доклали багато зусиль для розгортання мереж LTE, буде сенсом використовувати їх як частину нового покоління 5G. Зокрема, 4G може забезпечити кращий рівень покриття та зробити мережу 5G більш стійкою до відключень та меншою ймовірність недоступності послуг.

Існує потреба у тісній інтеграції між цими двома мережами. Дійсно, очікується, що фізичний рівень буде базуватися на OFDM, з різними нумерологіями, для того щоб врахувати різні варіанти використання [34]. Більше того, хоча операції управління доступом до середовища повинні бути адаптовані до нових фізичних вимог [29], очікується, що вищі рівні стеку протоколів мобільної мережі будуть спільними між LTE (та її похідними) та 5G.

2.1. Стек протоколів та мережева архітектура LTE

Перший комплексний вигляд стеку протоколів LTE та основних мережевих вузлів наведено на рис. 2.1. Мобільний стек LTE використовується для забезпечення ефективної комунікації між мобільними терміналами та eNB, і він взаємодіє з рівнем IP.

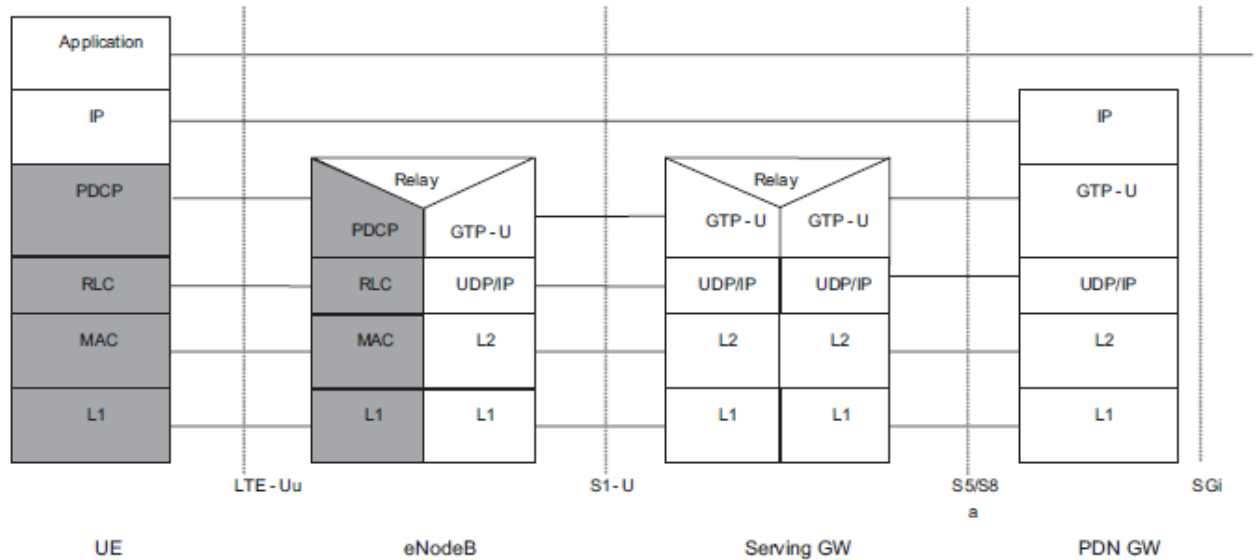


Рис. 2.1 Стек протоколів LTE

Фізичний рівень (PHY) та рівень контролю доступу до середовища (MAC) LTE

Рівень LTE PHY забезпечує функціональні можливості низького рівня (модуляція, кадрування), необхідні для передачі даних та пакетів управління через бездротовий носій. Система LTE може бути налаштована як дуплекс з поділом часу (TDD), або дуплекс з частотним поділом (FDD), і існують різні специфікації для кадрування на рівні PHY відповідно до обраної конфігурації. Також цей рівень відповідає за адаптивну модуляцію та кодування (AMC), контроль потужності, а також забезпечує вимірювання на рівні управління радіоресурсами (RRC) для таких процедур, як початковий пошук та синхронізація комірок.

Рівень MAC відповідає за відправку даних, отриманих з вищих рівнів до фізичних транспортних каналів, таким чином виконуючи мультиплексування та демultipлексування одиниць пакетних даних вищого рівня (PDU) в єдиний блок даних служб MAC (SDU) він також виконує планування на стороні eNB і звітування про стан буфера з UE в eNB. Крім того, механізм гібридного

автоматичного повторення запиту (HARQ) пропонує виправлення помилок за допомогою повторної передачі [35].

Рівні PHY і MAC також відповідають за процедуру довільного доступу (RA) після запуску з рівня RRC. Для кожного пристрою (eNB або UE) існує один екземпляр рівня PHY та MAC.

Рівень Управління Радіодоступом (RLC)

Рівень RLC [9] знаходиться над рівнем MAC, і він пересилає та приймає дані з рівня MAC через логічні канали. І в UE, і в eNB існує сутність RLC для кожного носія еволюціонованої пакетної системи (EPS), тобто для кожного потоку даних або сигналів. Рівень RLC діє як інтерфейс між рівнем PDCP і рівнем MAC, оскільки він буферизує дані, що надходять з рівня PDCP, і отримує можливості передачі (з точки зору байтів, які можуть бути передані) від нижнього рівня. Тому він сегментує та / або конкатенує PDCP PDU в RLC PDU, який може вписуватися в можливість передачі, і на стороні приймача виконує зворотний процес для отримання вихідних пакетів. Більше того, протокол RLC призначений для переупорядкування PDU RLC у випадку, якщо вони отримані не в порядку, наприклад через повторні передачі HARQ на рівні MAC.

Існує три різні можливі конфігурації рівня RLC:

- Прозорий режим (TM), який просто перетворює SDU RLC (тобто PDCP PDU) у RLC PDU. Він не може використовуватися для передачі даних у LTE, тут можна виконувати тільки такі операції, як передача повідомлень системної інформації, перших повідомлень у конфігурації RRC (Запит на підключення RRC та Налаштування підключення RRC) та підкачки;

- Режим без підтвердження (UM), який виконує сегментацію та конкатенацію RLC SDU на стороні передавача, повторну збірку та переупорядкування на стороні приймача та виявлення втрат пакетів. Повторна

передача не проводиться, і пакети просто оголошуються втраченими (навіть якщо відсутній один сегмент усього пакету). Ця конфігурація використовується для додатків, чутливих до затримок, які потребують дуже низької затримки (і це не дозволяє використовувати повторні передачі), за ціною втрат пакетів. Зверніть увагу, що рівень MAC пропонує механізм повторної передачі (HARQ), який, однак, обмежений максимальною кількістю повторних передач, як правило, 3;

- Режим підтвердження RLC (AM), який має ті самі функції UM, і додає механізм повторної передачі. Суб'єкт приймача періодично надсилає передавачеві звіт про стан, який містить інформацію про те, які пакети були втрачені, і вони повторно передаються, як тільки рівень MAC сигналізує про відповідну можливість передачі. Пакети та фрагменти можуть бути ще раз фрагментовані та реконструйовані на стороні приймача. Передавач може також сформувати звіт про стан, якщо він завершив передачу буферних пакетів. Структурна схема об'єктів передавача та приймача RLC AM наведена на рис. 2.2

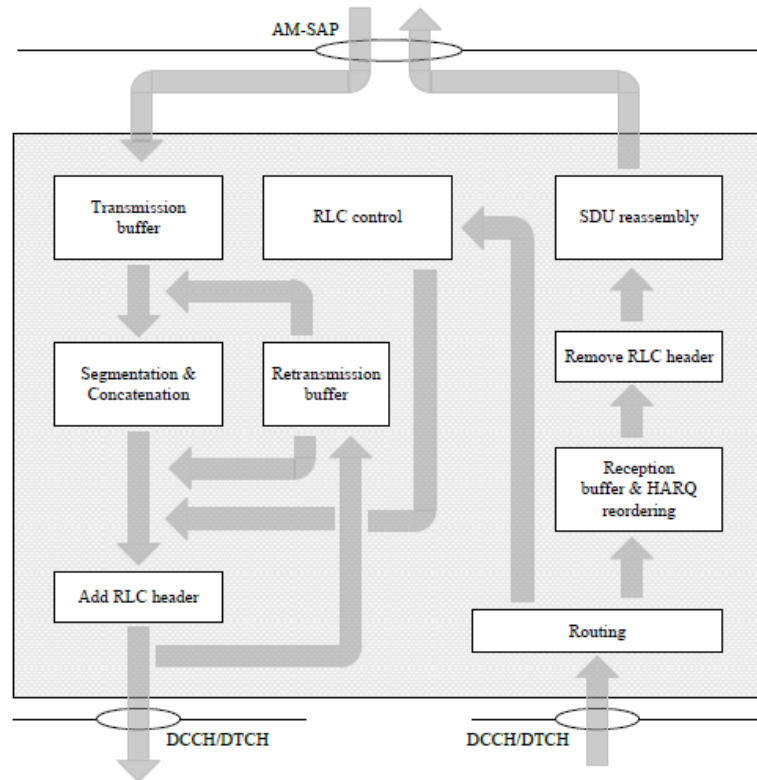


Рис. 2.2 Структурна схема RLC AM

PDU RLC несуть один або кілька (можливо, фрагментованих) RLC SDU і заголовок RLC, який містить порядковий номер та інформацію про управління корисним навантаженням.

Рівень протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP)

Рівень PDCP [36] збирає дані та пакети сигналізації з верхніх рівнів і пересилає їх до асоційованої сутності RLC. Він забезпечує першу точку входу для пакетних потоків у стек мобільних протоколів LTE, і для кожного носія EPS існує екземпляр PDCP. Він забезпечує доставку замовлення на верхні рівні та відкидає дані площини користувача, якщо закінчується час очікування. Однак його основними функціональними можливостями є стиснення заголовка (статичні частини заголовка верхнього рівня не передаються для кожного пакету, що зменшує накладні витрати) та безпека (шифрування та захист цілісності).

Протокол управління радіоресурсами (RRC)

Протокол RRC забезпечує функції управління для eNB і UE, і він підтримує передачу інформації, пов'язаної з управлінням, або в ефірі з eNB, або в обміні з одним UE. Зокрема, послуги, які він пропонує, пов'язані з [8, 37]:

- Трансляцією та прийомом системної інформації (SI), що включає початкові конфігурації eNB, необхідні UE для встановлення з'єднання;
- Встановлення, технічне обслуговування, модифікація та звільнення зв'язку RRC між eNB та UE. Протокол RRC має примітиви для налаштування радіоносіїв даних та сигналізації (DRB та SRB), для реконфігурації з'єднання під час хендверів та конфігурації нижніх шарів;
- Інтер-RAT мобільність, з передачею контексту, функціональними можливостями безпеки, командами передачі даних стільникового зв'язку;
- Збір вимірювань з рівня PHY (на UE) та звітування eNB.

Повідомлення RRC надсилаються через SRB. Конфігурація Signaling Radio Bearer 0 є фіксованою і відомою всім пристроям LTE, вона використовує RLC TM і відповідає за обмін першими повідомленнями RRC на початку налаштування з'єднання. SRB1 і SRB2, відповідно, призначені для повідомлень RRC із нормальним пріоритетом та низьким пріоритетом. Обидва ці SRB використовують RLC AM для надійної доставки повідомлення до іншої кінцевої точки.

Мережева архітектура LTE

Стандарт LTE надає специфіку для Еволюціонованої універсальної наземної мережі радіодоступу (E-UTRAN), яка є частиною радіодоступу та використовується разом із мережею Evolved Packet Core (EPC). Разом вони утворюють EPS [10].

Точкою входу в цю мережу є мережевий шлюз пакетних даних (P-GW), який має посилення на сервісний шлюз (S-GW). Цей вузол, який іноді

знаходиться спільно з P-GW, має відомості про те, до якого eNB підключено певне UE (зіставлене з IP-адресою), завдяки взаємодії з Суб'єктом управління мобільністю (MME). Вузол MME відповідає за відстеження UE, мобільність та оновлення шляху для кожного UE в S-GW.

Як показано на рис. 2.3, базові станції, а саме eNB, підключені до S-GW та MME через інтерфейс S1, який розділений на S1-MME (для каналу управління до MME) та S1-U (для каналу даних, до S-GW). У eNB пакети даних переадресовуються на рівень PDCP радіо стека. eNB підключені до своїх сусідів за допомогою інтерфейсу X2, який використовується для передачі команд передачі, даних під час передачі та інформації про завантаження [8]. Є також додаткові компоненти (шлюзи X2, шлюзи Home eNB), які дозволяють EPC забезпечувати неоднорідні функціональні можливості мережі.

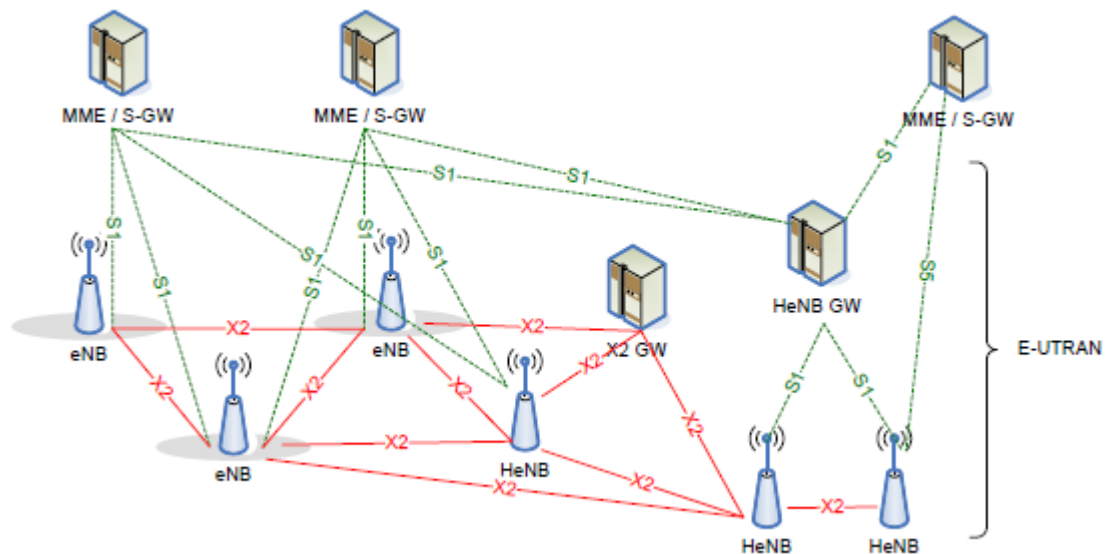


Рис. 2.3 Мережа доступу LTE, що складається з EPC і E-UTRAN

2.2. Інтеграція LTE-5G

Комунікації mmWave можуть забезпечити дуже високу пропускну здатність, але вони також страждають від великої мінливості якості прийнятого

сигналу, а також від перебоїв через будівлі та перешкоди. Крім того, очікується дуже щільне розгортання базових станцій. Це створює деякі ключові проблеми:

- часті передачі даних між сотами mmWave або застарілими RAT через мобільність користувача
- вплив відмови радіозв'язку (RLF), що спричиняє тривалі та енергоємні процедури довільного доступу. Ось чому основними гравцями нещодавно була запропонована інтеграція між застарілим RAT, таким як LTE, та новим інтерфейсом 5G.

У роботі [38] європейський проект «Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society» (METIS) розглядає 5G як сукупність еволюціонованих версій існуючих RAT (таких як, наприклад, LTE) та нових бездротових функціональних можливостей, що підходять для різних випадків використання. Отже, буде необхідність у нових архітектурах для управління цією системою мульти-RAT, з точки зору координації, взаємодії в мережах, управління радіоресурсами. Остаточний звіт METIS про архітектуру [19] пропонує, що LTE Advanced radio access може бути використаний як рівень покриття для підвищення надійності та полегшення розгортання мереж 5G. Зокрема, інтеграція LTE та 5G може принести користь різним додаткам, наприклад:

- уніфікований доступ до системи, з широкомовними повідомленнями із загальною інформацією для різних RAT, що надсилаються лише з LTE, загальним підкачуванням, високою стійкістю до мобільності завдяки кращому поширенню на частотах LTE;
- Агрегація площини користувача, або з можливістю передачі по безлічі ліній з метою максимізації пропускну здатності, або по лінії зв'язку за один раз, але з можливістю швидкого переключення з однієї RAT на іншу;

- Спільна площа управління, можливо, на нижчих частотах, щоб забезпечити більш надійну систему.

У звіті не вказується остаточна архітектура, яку слід прийняти, але пропонуються деякі міркування щодо вимог до різних інтеграційних рішень. У мобільному стеку деякі функції потребують синхронізації, тобто різні рівні повинні співпрацювати за жорстким графіком, а інші можуть бути асинхронними. Отже, синхронні функціональні можливості (такі як, наприклад, ті, що надаються рівнем MAC) повинні бути залежними від RAT і розгортатися в кожному eNB, тоді як асинхронні (тобто служби вищого рівня) можуть бути централізованими або спільними для різних RAT. Інший розгляд стосується можливості спільного розміщення точок доступу (тобто базових станцій) різних RAT. Це було б більш дорогим рішенням для розгортання, але мало б можливість інтегрувати синхронні послуги різних RAT.

2.2.1. Різні варіанти архітектури для забезпечення тісної інтеграції

Рівень, на якому стикаються стеки протоколів LTE та 5G, визначається як рівень інтеграції. Цей рівень має інтерфейс для нижчих рівнів, які належать до різних технологій радіодоступу, але пропонує однакові послуги для рівня інтеграції. Останній буде доставляти пакети з верхніх шарів до різних RAT, і збирати трафік, що надходить з різних нижніх шарів.

У роботі [16] є аналіз основних плюсів і мінусів використання рівнів PHY, MAC, RLC або PDCP в якості точок інтеграції:

- *Спільний рівень PHY*: це рішення могло б бути життєздатним, оскільки OFDM або один із його варіантів, як очікується, буде основою для фізичного рівня 5G. Однак, у 5G будуть використовуватися дуже різні структури кадрів та нумерології, для різних випадків використання. Тому інтеграція LTE та 5G на рівні PHY є дуже складним завданням, і вигода при цьому буде обмеженою. Більше того, використання загального шару PHY обмежує можливість зміни

стеку верхніх шарів, щоб адаптувати його до вимог 5G. Нарешті, операції на рівні PHY в цьому випадку повинні бути щільно синхронізовані, і це запобігає нерозташованому розгортанню eNB для різних RAT;

- **Спільний рівень MAC:** інтеграція на рівні MAC може забезпечити високий рівень координації. Можливим варіантом агрегації MAC є агрегація несучих, яка вже стандартизована для LTE [39]. На цьому рівні можна координувати планування ресурсів для різних RAT, виконувати HARQ на різних носіях і уникати складності передачі контексту між RLC та PDCP, оскільки існував би один примірник обох, для кожного пред'явника. Однак, що стосується рівня PHY, операції на рівні MAC синхронізуються, дозволяючи лише розгортання спільно розташованих RAT. Більше того, LTE та 5G можуть бути розроблені з різними рішеннями дуплексного зв'язку та різними схемами розподілу часу та частоти. Тому, хоча можливі вигоди дуже привабливі, інтеграція на рівні MAC обмежує можливості проектування управління доступом 5G на відміну від LTE, не дозволяючи абсолютно нового дизайну, який враховує особливості комунікацій mmWave;

- **Спільний рівень RLC:** цей вибір має деякі обмеження, які можуть завадити розгортанню без спільного розміщення. Дійсно, рівень RLC приймає від планувальника рівня MAC вказівки про можливості передачі, тобто про те, скільки байтів доступно для передачі протягом наступного інтервалу. Цей зв'язок не може піддаватися додатковим затримкам зв'язку MAC-RLC між віддаленими місцями розташування. Більш того, сегментація і повторна збірка працюватимуть тільки при наявності загального планувальника. Нарешті, основною перевагою інтеграції на рівні RLC є наявність однієї передачі і, для AM RLC, буфера повторної передачі, і це дозволяє поліпшити координацію між двома RAT;

- **Спільний рівень PDCP:** рівень PDCP не має строгих вимог до синхронізації і, отже, може бути підходящим кандидатом в якості рівня інтеграції, коли бажаний підхід, не пов'язаний зі спільним розміщенням. Інтеграція на рівні PDCP дозволяє створити з чистого аркуша рівні PHY, MAC і RLC, щоб їх можна було адаптувати до нових вимог мереж 5G.

LTE як резервна копія 5G: точка зору SDN

У роботах [17] та [40] існує інтеграція 5G та LTE з програмно визначеної точки зору мережі.

Однією з основних причин інтеграції LTE та 5G є економічна: 5G, ймовірно, буде розроблено поверх існуючої та вже розгорнутої інфраструктури LTE [17]. Ось чому рівні протоколу 5G повинні мати можливість інтегруватися та співіснувати зі стеком LTE, особливо на верхніх шарах. Потрібно розробити рішення для мультислужу, щоб:

- підтримувати гнучку та, можливо, динамічну централізацію певних послуг мережі радіодоступу (RAN);
- враховувати пропускну здатність зворотного зв'язку та обчислювальну потужність, доступну в розподілених вузлах (eNB, координатори);
- забезпечити інтерфейс для мережевого контролера, якщо використовується SDN.

Мережа, визначена програмним забезпеченням, може також використовуватися для того, щоб забезпечити можливість оркеструвати доступ до тієї чи іншої RAT, якщо мобільний термінал перебуває під охопленням різних технологій (LTE, 5G, Wi-Fi) [40]. Багатофункціональне підключення дозволить також виконувати балансування навантаження та призначати ресурси різним RAT відповідно до потреб трафіку та якості сигналу за різними посланнями.

Очікувані переваги від тісної інтеграції LTE-5G

Інтеграція нового радіоінтерфейсу 5G, який, ймовірно, працюватиме на частотах mmWave, з уже розгорнутим LTE, на частотах microWave, може покращити продуктивність мереж 5G.

Переваги можна узагальнити у дві категорії:

- орієнтованість на стійкість;
- орієнтованість на пропускну здатність.

Наприклад, надійність зв'язку як на площині користувача, так і на площині управління може бути підвищена за допомогою механізму швидкого перемикавання (FS), при якому як LTE, так і радіостанції 5G перебувають у підключеному режимі, але насправді лише одна з двох використовується. Якщо якість сигналу на лінії зв'язку, яку в даний час використовує UE, погіршується нижче певного порогу, мобільне обладнання може просто переключитися на іншу лінію зв'язку, отримавши команду від eNB. У нинішніх мобільних мережах це робиться шляхом хендоверу, який, однак, вимагає тривалої процедури, яка може ввести значну затримку. Інший підхід заснований на рознесенні передачі з однаковим пакетом, що надсилається на обидві лінії зв'язку, але це обмежує систему швидкістю передачі даних LTE.

Натомість рішення, орієнтовані на пропускну здатність, використовують обидва канали одночасно, щоб збільшити пропускну здатність і, отже, пропускну здатність, доступну для UE. Нарешті, за допомогою багатопідключеного пристрою можна передавати системну інформацію про всі RAT на одному радіоінтерфейсі (наприклад, LTE) і вимикати всі інші, коли вони не використовуються. Це зменшує як споживання енергії, так і накладні витрати в ефірних інтерфейсах, які не використовуються для передачі SI [16]. Більше того, передача широкомовної інформації на діапазонах LTE

розглядається в [29] як можливий спосіб вирішення проблеми спрямованих передач при виконанні ІА.

2.2.2. Подвійне підключення для мобільних мереж LTE

У [10] є основний опис функціональних можливостей, необхідних для підтримки постійного струму. Зокрема, зазначено, що «E-UTRAN підтримує операцію подвійного підключення, завдяки чому багаторазове UX / Tx UE в RRC_CONNECTED налаштовано на використання радіоресурсів, що надаються двома різними планувальниками, розташованими в двох eNB, підключених через неідеальний зворотний зв'язок через X2 інтерфейс». ENB, задіяний у з'єднанні постійного струму, може бути ведучим (MeNB) або вторинним (SeNB), а UE в постійному струмі підключається до одного MeNB і одного SeNB одночасно.

Існує 3 різні типи носіїв EPS, які можна встановити:

- Ведучий носій Master Cell Group (MCG);
- Вторинний носій (SCG);
- Розділений носій;

Три різні конфігурації показані на рис. 2.4. Носій MCG - це наскрізний носій, який використовує ведучу eNB, тоді як SCG використовує вторинну eNB. Для підтримки цих носіїв обидві eNB мають підключення з інтерфейсу S1 до S-GW і P-GW. Натомість розділений носій - це єдиний потік, який переадресовується від базової мережі до MeNB PDCP, який розділяє трафік на RLC MeNB і RLC SeNB. Зв'язок між PDCP та віддаленим RLC виконується за допомогою X2.

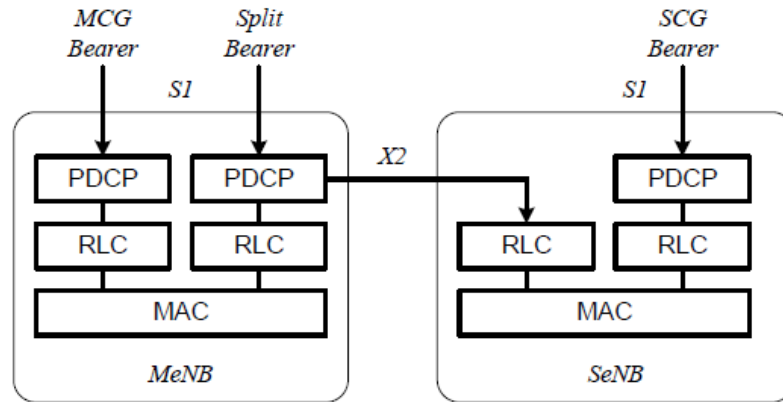


Рис. 2.4 Архітектура радіопротоколу для DC

У цій пропозиції є тільки один об'єкт RRC, який розташований в MeNB. Таким чином, SRB завжди конфігуруються як носії MCG і використовують тільки радіоресурс MeNB. Отже, існує тільки одне з'єднання від RAN до MME на DC UE. Кожна базова станція повинна мати можливість обробляти UE незалежно, тобто служити в якості ведучого для деяких UE і в якості вторинного для інших. Кожен eNB, задіяний в DC для певного UE, управляє своїми радіоресурсами і в першу чергу відповідає за виділення радіоресурсів в своїй соті. Координація між MeNB і SeNB виконується за допомогою сигналізації X2.

У звіті 3GPP [42] є ще одне дослідження щодо різних можливих конфігурацій для установки подвійного підключення в неоднорідному мережевому сценарії. Зокрема, він зосереджується на подвійному підключенні для площини користувача та перелічує деякі варіанти, а саме 1A, 2A, 2B, 2C, 2D, 3A, 3B, 3C та 3D. Ці цифри представляють різні варіанти конфігурації завершення інтерфейсу S1-U на головних та вторинних eNB:

- 1 інтерфейс S1-U закінчується як на MeNB, так і на SeNB;

- 2 Інтерфейс S1-U закінчується на MeNB, але в Мережі радіодоступу не виконується розділення носія (тобто два незалежних носія передаються через S1-U до MeNB, а один з двох передається в SeNB через X2);

- 3 S1-U закінчується в MeNB, і розділення несучої виконується в RAN, тобто існує одна несуча для кожного подвійного UE, і її потік розділений в MeNB.

Кожен варіант доповнюється літерою (A, B, C, D), де:

- A означає незалежні рівні PDCP, тобто в MeNB та SeNB є незалежні кінцеві точки площини користувача;

- B позначає рівні PDCP Master-Slave, тобто частина рівня PDCP знаходиться в MeNB, а інша, яка виконує роль веденого пристрою, знаходиться в SeNB. Однак у звіті не вказуються деталі функціонального розподілу між двома рівнями PDCP;

- C означає незалежні рівні RLC, тобто існує один рівень PDCP, який знаходиться в MeNB, і два незалежних рівні RLC в головній та вторинній комірці;

- D означає Master-Slave RLC, тобто, як і в варіанті C, в MeNB є один рівень PDCP і основний рівень RLC. Останній може переадресовувати деякі PDU RLC (тобто пакети, готові до передачі на рівень MAC, вже сегментовані та з порядковими номерами, присвоєними ведучому) на підпорядкований рівень RLC в SeNB.

Ці 9 варіантів додатково аналізуються з плюсами і мінусами. Зокрема, у звіті розглядаються питання впровадження та вплив на стандарт. Наприклад, усі варіанти вимагають розширення інтерфейсу X2 між eNB, щоб підтримувати сигналізацію та координацію та передачу пакетів (або як PDCP PDU або SDU, або як RLC SDU). Варіанти C і D вимагають також віддаленої координації між рівнями PDCP і RLC. Ще одним аспектом, який розглядається, є безпека.

Наприклад, альтернатива А вимагає двох різних шифрувань у MeNB та SeNB (оскільки ця функціональність розташована на рівні PDCP), тоді як В, С та D - ні. Нарешті, враховані модифікації механізмів передачі та прийому. Зокрема, кількість об'єктів PDCP та RLC, необхідних для кожного носія, та необхідний рівень координації розглядаються: альтернатива 3А вимагає двох PDCP навіть для роздільних носіїв, отже, йому потрібен новий рівень над PDCP, в якому потоки можуть бути розділені, і це має великий вплив як з точки зору стандартизації, так і ефективності. Натомість варіант 1А може обслуговувати кожен з двох незалежних потоків несучих з одним із двох незалежних PDCP, і, отже, він не вимагає змін у стеку протоколів.

Іншими аспектами, які розглядаються, є мобільність SeNB та її прозорість для базової мережі, а також необхідні перебої в роботі служби. Наприклад, альтернативі 1А потрібен буде повний перемикач шляху в базовій мережі із залученням MME. Те саме стосується динамічного розвантаження, тобто для можливості динамічного маршрутизації трафіку в двох eNB відповідно до радіоумов, перевантаження та ін. Альтернатива 1 вимагає втручання MME для зміни розподілу потоку між двома носіями, тоді як альтернативи 2 і 3 не потребують залучення MME, і динамічне розвантаження відбувається на рівні eNB.

Нарешті, враховується потужність обробки MeNB. З альтернативою 1 MeNB не обробляє жодного трафіку SeNB. Варіант 2 також дозволяє лише полегшену операцію (маршрутизація пакетів до SeNB), тоді як альтернатива 3 є найбільш обчислювально дорогою для MeNB, оскільки вона повинна обробляти весь трафік SeNB, а в деяких випадках (3В, 3С, 3D) він також повинен його шифрувати та дешифрувати. Це також впливає на розмір буферів сутностей PDCP та RLC.

У звіті робиться висновок, що для подальших досліджень та оцінки ефективності можна розглядати лише 1А та 3С, оскільки альтернатива 1А не вимагає зворотного перегляду та координації між eNB, але, як очікується, це забезпечить менший приріст продуктивності, тоді як варіант 3С потребує швидкого зворотного перегляду але обіцяє більший приріст продуктивності завдяки більшій координації між MeNB та SeNB.

Потім він визначає 2 альтернативні схеми для RRC, перша з шаром RRC лише в MeNB, а друга з RRC в обох eNB. Один рівень RRC спрощує стек протоколів UE, але потребує пересилання повідомлень SeNB, пов'язаних з RRC, до MeNB через X2.

2.2.3. Хендовер в LTE

LTE підтримує передачу даних всередині E-UTRAN, а також на інші застарілі RAT (UMTS, CDMA2000, GSM). Існує процедура передачі обслуговування на основі X2 та на основі S1. Перша використовується лише для хендоверів внутрішнього RAT і заснована на взаємодії між джерелом та цільовим eNB. Натомість друга використовується, коли між eNB немає зв'язку X2 або коли хендовер спрямований на іншу RAT. Передача між RAT, справді, вимагає переміщення UE в інший MME, який обробляє мобільність іншої мережі радіодоступу, і ця послуга надається за допомогою передачі обслуговування на основі S1 [8].

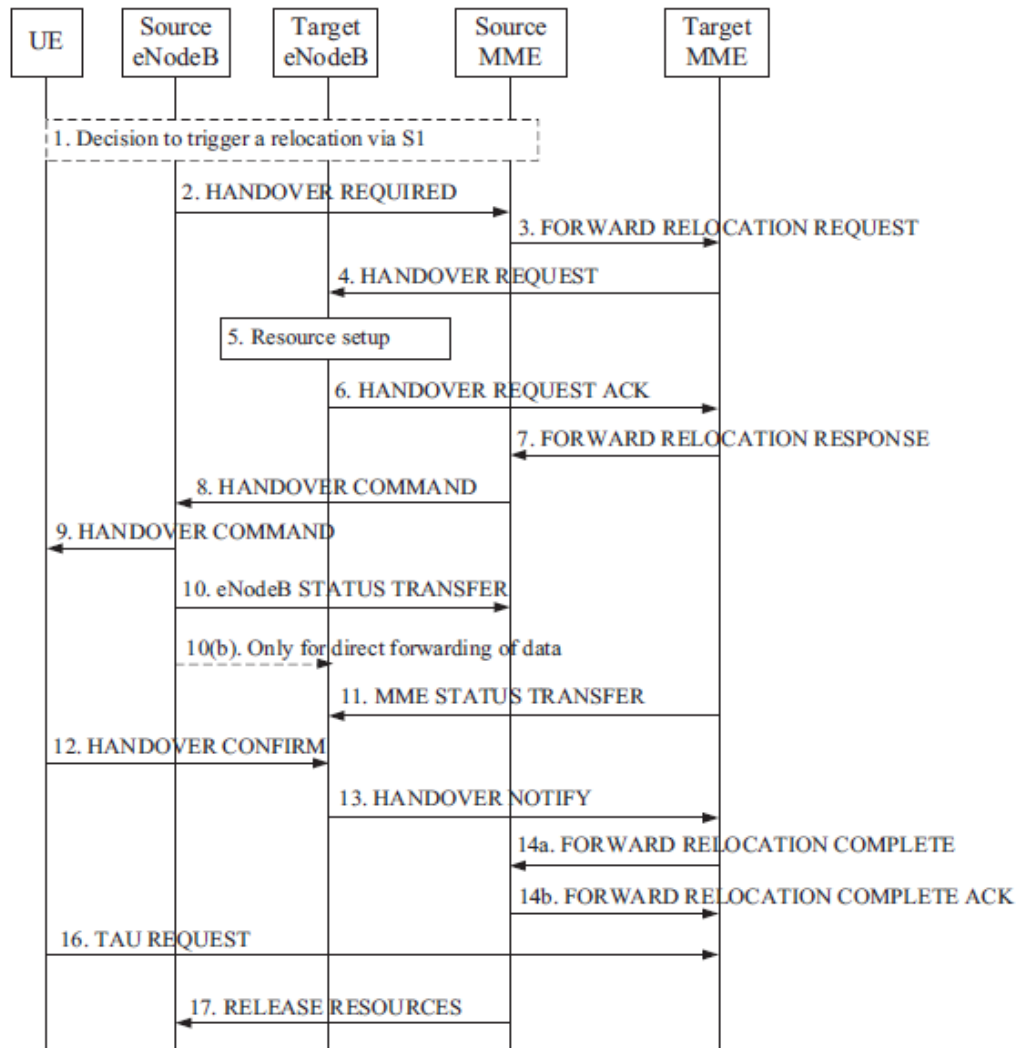


Рис. 2.5 Процедура хендоверу на базі S1

Процедура хендоверу на основі S1 показана на рис. 2.5. Він передбачає обмін кількома повідомленнями з вузлами базової мережі, і це може збільшити затримку операції із перериванням служби до 300 мс [43].

Замість цього, як показано на малюнку 2.6, запит передачі обслуговування на основі X2 включає базову мережу тільки в кінці, щоб переключити шлях від S-GW до цільового eNB. Він розроблений для обмеження втрати даних під час передачі обслуговування. Зверніть увагу, що після прийому команди передачі обслуговування UE має пройти повну процедуру довільного доступу. Однак це

RA без конкуренції, тобто цільова eNB резервує ID преамбули для вхідного UE, який повідомляється UE за допомогою команди передачі обслуговування від вихідного eNB.

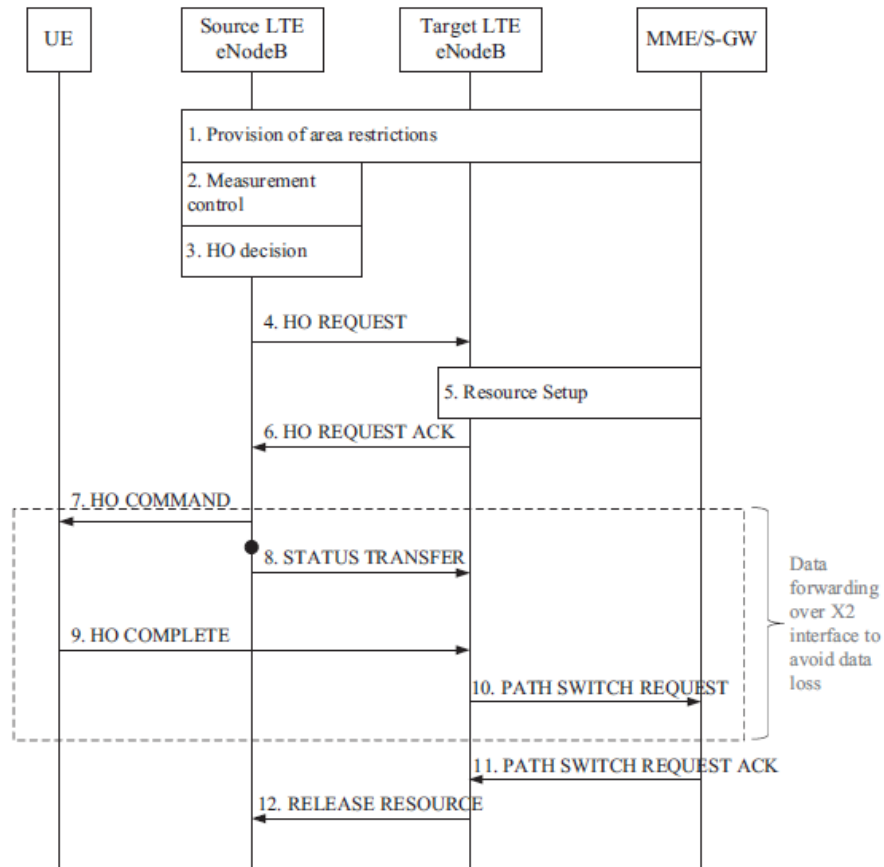


Рис. 2.6 Процедура хендоверу на базі X2

Існують також два різні режими передачі PDCP: безперервна передача та передача без втрат. З моменту, коли джерело eNB отримує ACK запиту на передачу від цільового eNB і надсилає команду передачі до UE, пакети, які надходять до вихідного eNB від базової мережі, пересилаються через X2 до цільового eNB. Ця переадресація закінчується, коли S-GW отримує повідомлення про запит перемикавання шляхів, яке, в свою чергу, починає пересилати пакети для UE до цільового eNB. Більше того, також буфери RLC передаються від джерела до цільового eNB двома різними способами,

відповідно до обраного режиму хэндовера. Безшовний НО використовується для носіїв, які використовують RLC UM, а пакети, вже оброблені PDCP, і в буферах RLC або нижчого рівня не пересилаються, і таким чином втрачаються якщо ще не передані в UE. Це використовується, наприклад, у додатках, чутливих до затримок, але стійких до втрат. Натомість, коли використовується RLC AM і вибирається НО без втрат, пакети в буферах RLC AM фактично перенаправляються в цільовий eNB і повинні надсилатися в UE перед тим, як фактично відправляється будь-який інший пакет. Буфери, які переадресовуються, - це ті з PDCP PDU, які ще не передані, ті, що передані, але ще не підтверджені, та ті, що мають пакети, що очікують повторної передачі.

Висновки

1. Було детально розглянуто мережеву архітектуру LTE. Досліджено різні рівні та протоколи стеку LTE з описом функціональності.
2. Досліджено існуючі варіанти інтеграції мереж LTE та 5G, дослідження по цій тематиці, переваги та недоліки, які виникають при такому варіанті розгортання.
3. Розглянуто процедуру подвійного підключення в LTE. Описано можливі варіанти та проаналізовано кожен з них. Описано процедуру в LTE.

РОЗДІЛ 3

ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ 5G

В цьому розділі буде обговорено запропоновану архітектуру для інтеграції LTE-5G на рівні PDCP, представлено як архітектуру ядра мережі так і рішення для подвійного підключення абонента та представлено реалізацію в NS – 3. Спочатку будуть описані загальні особливості та архітектурний вибір. Потім у цій главі буде зосереджено увагу на функціях, необхідних для підтримки швидкого переключення, тобто формі подвійного підключення, при якій UE підключено до обох RAT, але використовує лише одну з двох одночасно для передачі даних. Підключившись до обох, UE буде перемикатися між ними за допомогою одного повідомлення RRC. Крім того, буде описано базовий рівень для порівняння, тобто жорсткий хэндовер (HH) між LTE та 5G, а також деякі деталі реалізації.

3.1. Архітектура тісної взаємодії LTE-5G

Впровадження 5GS для забезпечення мобільного широкосмугового зв'язку (MBB) в існуючій мережі 4G EPS істотно вплине на всі мережеві домени - від RAN до ядра пакетної передачі, призначених для користувача даних, політик і послуг, а також на серверні системи.

EPS в основному використовується сьогодні для безлічі варіантів використання MBB. У деяких випадках розгорнуті EPS вже були оновлені для ранньої підтримки 5G автономним (NSA) New Radio (NR). Багато операторів 4G і NSA NR вже вирішили ввести - або розглядають можливість впровадження - 5GS відповідно до стандарту 3GPP.

5GS вводить підтримку автономного сценарію NR (SA) [56] і призначений для підтримки існуючих варіантів використання MBB, а також нових і поліпшених. Ericsson вважає, що оператори можуть задовольнити зростаючі

потреби в трафіку і швидко впровадити нові інноваційні послуги, використовуючи NSA NR і SA NR [57].

У період міграції, коли створюється покриття NR, послуги, що вимагають широкого покриття, найкраще підтримуються за допомогою взаємодії між ядром 5G (5GC) і існуючим ядром Evolved Packet Core (EPC). Взаємодія з EPC створює залежність від системної інтеграції серверних систем підтримки бізнесу (BSS), оскільки призначені для користувача дані і політики повинні підтримувати дві мережі (EPC і 5GC). Нові пристрої повинні підтримувати можливості, пов'язані з 5GS, в той же час пристрої, які підтримують тільки EPS, включаючи пристрої вхідного роумінгу, будуть існувати протягом тривалого періоду і вимагатимуть відповідної підтримки мережі. Ця довгострокова потреба є вагомим аргументом на підтримку концепції дворежимного рішення для базової мережі, яке включає в себе функції EPC і 5GC.

Ключовою перевагою рішення дворежимної базової мережі є загальна операційна модель для EPC і 5GC, яка спрощує управління всією системою. Вона також включає більш детальне управління життєвим циклом окремих програмних модулів (так званих мікросервісів), засноване на принципах розгортання і експлуатації в хмарі [58]. Загальна операційна модель може використовуватися для динамічного і гнучкого масштабування окремих мікросервісів в залежності від потреб в ємності, наприклад для перебалансування використання ресурсів EPC і 5GC, коли парк пристроїв з часом еволюціонує з 4G на 5G.

3.1.1. Архітектура 5GS для взаємодії з EPS

Впровадження 5GS в мережі вимагає комплексної стратегії, яка враховує всі мережеві домени, стратегію покриття, ресурси спектра і пристрої, а також те, які послуги і де пропонувати. Серед іншого, 5GC, пакетне ядро в 5GS, вводить нові мережеві функції і інтерфейси всередині і щодо систем підтримки операцій

і BSS, включаючи системи тарифікації. Воно також має нові інтерфейси і протоколи для RAN наступного покоління (NG-RAN) і пристроїв, а це означає, що міграція RAN, включаючи ресурси спектра і стратегії пристроїв, повинна бути скоординована з впровадженням 5GC.

Крім того, будь-який план по впровадженню 5GC повинен враховувати його нову архітектуру, засновану на сервісах, яка включає функцію мережевого сховища для реєстрації та пошуку послуг, а також нові можливості, такі як підтримка поділу мережі і розкриття мережі.

Оператори з доступом до NR і LTE можуть скористатися наявними можливостями 5GC для тісної взаємодії з EPS. На рисунку 3.1 показана архітектура 5GS для тісної взаємодії EPC-5GC. Щоб забезпечити збереження IP-адреси при підключенні і перемиканні між доступом 4G і 5G, архітектура 5GC включає точку прив'язки загальної площині користувача (UP), реалізовану функцією управління сеансом, а також функцію площині управління шлюзу мережі пакетних даних (SMF + PGW-C) і функція площині користувача плюс функція площині користувача PGW (UPF + PGW-U).

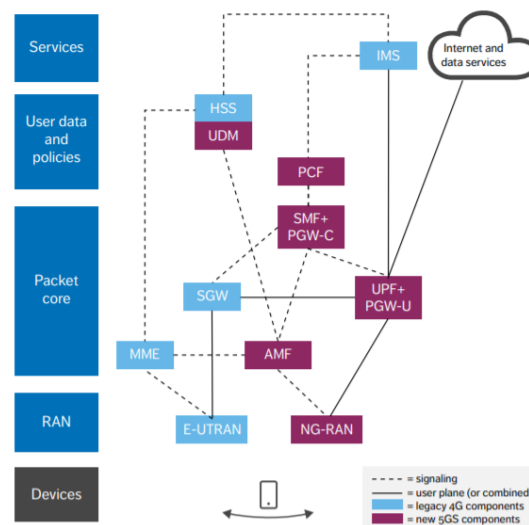


Рис. 3.1 Архітектура тісної взаємодії EPC та 5GC

Для підтримки безперервності обслуговування і передачі обслуговування, керованого мережею, об'єкт управління мобільністю (MME) і нова функція

управління доступом і мобільністю (AMF) взаємодіють безпосередньо через еталонну точку N26, яка підтримує пристрої в режимі одиночної реєстрації (пристрій або зареєстрований в MME або в AMF , але не в обох одночасно). Еталонна точка N26 використовується для мобільності як в режимі очікування, так і в режимі підключення; пристрій ініціює мобільність в режимі очікування (можливо, запускається RAN), в той час як режим з'єднання ініціюється RAN, і пристрій інформується про завершення підготовки до передачі обслуговування. Крім того, тісна взаємодія також включає в себе, як зіставити сеанси протокольних блоків даних (PDU) в 5GS з сполуками пакетних даних (PDN) в EPS і навпаки.

Архітектура взаємодії гарантує, що нові пристрої з підтримкою 5GC завжди будуть підключатися до UPF в 5GC незалежно, якщо вони підключені через доступ 4G або 5G, що дозволяє зберігати IP-адресу при переміщенні пристроїв між доступом. Таким чином, характеристики послуг зберігаються, оскільки будь-які розміщені в одному місці додаткові послуги, підключені до UPF, однакові, а функція управління політиками (PCF) застосовує політики сеансу для пристрою при підключенні через доступ 4G або 5G.

Для пристрою, що використовує доступ NR або LTE, необхідно забезпечити однакоє управління політиками і підпискою. Архітектура міжмережевої взаємодії забезпечує кілька можливостей 5GC також через LTE / EPS, включаючи підтримку поділу мережі. Оператори можуть перейти від існуючого EPS до дворежимного мережевого рішення EPS і 5GC, шляхом переносу пакетного шлюзу, контролю політик, підписки і управління даними, а також запровадивши нові функції.

3.1.2. Рішення проблем міграції, пов'язаних з доменом

Надійна стратегія переходу від EPS до 5GS буде враховувати і вирішувати проблеми, пов'язані з пристроями і всіма чотирма мережевими доменами: RAN, пакетне ядро, призначені для користувача дані і політики, а також послуги.

Домен RAN

На багатьох ринках новий спектр NR спочатку буде доступний для середніх і високих частот. Залежно від мережі сайту, введення NG-RAN з NR SA тільки на цих діапазонах може привести до нерівномірного покриття NR, яке підходить тільки для локальних послуг. При розгортанні NR SA для MBW важливо забезпечити безперервне покриття NR в цільовій зоні обслуговування (наприклад, в місті), щоб уникнути частої мобільності між NR і LTE.

Досягнення більш високої пропускної здатності і безперервного покриття вимагає комбінації NR на середніх і високих діапазонах для пропускної здатності і NR FDD на досить низьких діапазонах для покриття. Спектр NR FDD в нижньому діапазоні може бути або новим, або перефермованим, або існуючим діапазоном LTE, який спільно використовується NR і LTE з використанням динамічного спільного використання спектра. Смуги NR можуть бути об'єднані з використанням агрегації несучих (CA) або, в деяких випадках, подвійного підключення.

NR CA буде мати життєво важливе значення для надання постачальникам послуг можливості обслуговувати зростаюче число пристроїв 5G в мережі, зберігаючи при цьому загальну продуктивність мережі і зручність роботи користувачів. Це робиться шляхом активації CA в низхідній лінії зв'язку (FDD + TDD) в областях з NR нижньої і середньої смуги. Це не тільки збільшує покриття NR в середній смузі і, отже, збільшує пропускну здатність, але також забезпечує додаткове збільшення покриття, дозволяючи перемістити частину сигналізації NR в нижні смуги. Це може забезпечити додатковий виграш в бюджеті каналу на 3-7 дБ в низхідному каналі.

NR SA з CA знижує складність RAN і пристроїв в порівнянні з подвійним підключенням, як в NR NSA. Пристрою не потрібно передавати дані по двох висхідних каналах одночасно. Використання NR SA також скорочує час від знаходження пристрою в неактивному режимі до повної пропускну здатності NR, що забезпечується за рахунок передачі всіх керуючих сигналів через NR замість залежності від LTE і налаштування подвійного підключення. Перевага для споживача полягає в більш швидкому доступі до повного потенціалу об'єднаної ємності NR, наприклад, при завантаженні файлу або запуску відео.

Для підтримки існуючих і майбутніх сервісів, таких як голосовий зв'язок і екстрена допомога, при міграції MBW на 5GS, NR SA необхідно підтримувати можливості і вимоги покриття, такі як міжсистемна передача обслуговування, позиціонування і QoS. Це може бути поетапний перехід.

Домен даних та політик користувача

Архітектура тісної взаємодії EPC-5GC, показана на рисунку 3.1, передбачає загальну підтримку управління підпискою незалежно від технології доступу, яка використовуватиметься даними користувачем. Хоча зображена комбінована функція HSS / UDM (домашній сервер передплатників / уніфіковане управління даними), перші розгортання підтримують управління підпискою для EPC і 5GC шляхом взаємодії між окремими HSS і UDM через HTTP / REST (протокол передачі гіпертексту / передача репрезентативного стану).) інтерфейс.

Існуюча функціональність HSS повинна бути розширена, щоб забезпечити взаємодію з UDM і підтримувати тісний контакт між EPC і 5GC. Еволюція включає оновлення функціональності HSS, пропонованої обслуговуючим вузлом EPC, з, серед іншого, параметрами підписки, які дозволяють користувачеві отримати доступ до 5GC для забезпечення безперервності сеансу IP і єдиної реєстрації через EPC і 5GC.

Після впровадження 5GC для MBW сеанси прив'язані до функції SMF + PGW-C. Використання SMF + PGW-C дозволяє замінити функцію управління політиками і правила тарифікації (PCRF), використовувані для управління політиками в EPS, новою дворежимною системою управління політиками, яка підтримує пристрої з підтримкою 5G незалежно від технології доступу використовувані в даний час.

Бізнес-логіка HSS / UDM і PCF / PCRF також в значній мірі залежить від того, як дані підписки і дані підписки політик управляються (тобто надаються, зберігаються і доступні). EPS дозволяє підтримувати багаторівневу архітектуру, в якій HSS і PCRF використовують зовнішню базу даних для управління даними підписки. Ці бази даних відомі як репозиторій для користувача даних (4G-UDR) для даних підписки HSS і репозиторій профілів підписки (SPR) для даних підписки на політику PCRF. 5GC узагальнює концепцію в єдиному репозиторії даних (5G-UDR). У 5G-UDR зберігаються дані про підписку, підписки на політику, додатки і вподобання.

Під час впровадження 5GC вигідно розгорнути нову дворежимну систему управління підпискою, даними і політиками, яка підтримує архітектуру і процедури тісної взаємодії EPS-5GC, як показано на рисунку 3.2.

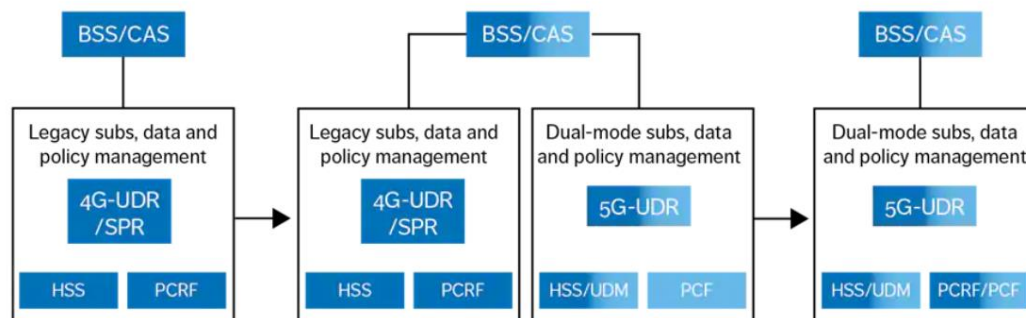


Рис. 3.2 Перехід на дворежимну підписку, системи управління даними і політиками

Дворежимна система управління даними забезпечує централізацію даних по підписці і єдину точку надання в нових примірниках 5G-UDR для

передплатників з підтримкою 5G. Це вимагає перенесення даних підписки з застарілої 4G-UDR / SPR у 5G-UDR. Цьому процесу міграції можуть допомогти інструменти автоматичної міграції та / або механізми автоматичної ініціалізації / активації, включені за допомогою повідомлень в BSS / CAS (система адміністрування клієнтів), наприклад, виявлення користувача тільки 4G за допомогою пристрою з підтримкою 5G. і / або бути активним в 5GC.

В якості першого кроку міграції функціональність HSS в застарілій системі управління підпискою може як і раніше використовуватися для користувачів з підтримкою 5G, коли вони підключаються через EPC. Існуючі екземпляри HSS можуть отримувати дані підписки для користувачів з підтримкою 5G з 5G-UDR через локальний 4G-UDR / SPR, наприклад, з використанням пропрієтарних інтерфейсів. PCF в дворежимній системі управління політиками підтримує користувачів з підтримкою 5G, навіть якщо вони підключаються через EPC.

В якості альтернативи користувачі з підтримкою 5G можуть обслуговуватися функціями HSS в дворежимній системі управління підпискою, коли вони підключаються через EPC. Дворежимна підписка, системи управління даними і політиками для підписок з підтримкою 5G можуть співіснувати з існуючими системами управління підпискою, даними і політиками для застарілих підписок 4G (існуючі екземпляри HSS і PCRF і 4G-UDR / SPR) за підтримки функції маршрутизації сигналізації.

У будь-якому випадку мета полягає в тому, щоб управляти всіма типами підписок (навіть застарілими підписками тільки для 4G) в новій дворежимній системі для управління підписками, даними і політиками, як показано праворуч на рисунку 3.2. Дизайн цього рішення дотримується принципів загальної операційної моделі, заснованої на хмарній реалізації, і пропонує свої переваги для управління як новим абонентами з підтримкою 5G, незалежно від

використовуваної технології доступу, так і користувачам 4G, які підключаються тільки через EPC.

Домен ядра

Відповідно до визначення, базовий домен пакета включає в себе функціональні можливості для управління доступом і мобільністю (MME, AMF), управління сеансами, функцію площини управління обслуговуючим шлюзом (SGW-C), PGW-C, SMF і функціональність UP (SGW -U / PGW-U, UPF).

Початкове впровадження 5GC для глобальних послуг дозволяє переносити RAN і ядро незалежно один від одного, аналогічно переходу від 3G до 4G. До випуску стандартизації 5G, 3GPP також стандартизував поділ функцій шлюзу в EPC на площину управління (CP) і UP, відому як CUPS. Це поділ відкриває нові можливості для розподілу UP і крайового прориву трафіку вже в EPC. Наприклад, окремі з'єднання PDN можуть використовувати різні SGW-U / PGW-Us в центральному та локальному розгортанні. Функціональний розподіл CP і UP в EPC CUPS перенесено в архітектуру 5GC, відповідну SMF і UPF.

Наявність тісної взаємодії CUPS і EPC-5GC дозволяє використовувати кілька можливих шляхів міграції від EPC до 5GC. Один з варіантів - спочатку ввести CUPS в EPS, що дозволяє оператору використовувати поділ CP і UP перед переходом на 5GS. Це може бути корисно для задоволення підвищеного попиту на трафік при впровадженні NR NSA і підготовки до плавного переходу на 5GC на основі реалізації UP, яка підтримує як EPC, так і 5GC.

Інший варіант - запровадити CUPS одночасно з 5GC, поєднавши SMF + PGW-C з функціональністю SGW-C і UPF + PGW-U з функціональністю SGW-U. Це дозволяє обслуговувати нові високопродуктивні пристрої 5G за допомогою архітектури розділеного шлюзу CP і UP при підключенні через

доступ 4G або 5G, як показано в середній частині рисунка 3.3. Додатковою перевагою цього спільного розміщення є можливість для більш гнучкого розподілу UP в різних місцях, наприклад, для рішення послуг з малою затримкою шляхом розміщення UP ближче до RAN. Тісна взаємодія 5GC також може взаємодіяти із застарілою SGW, як показано на рисунку 3.1.

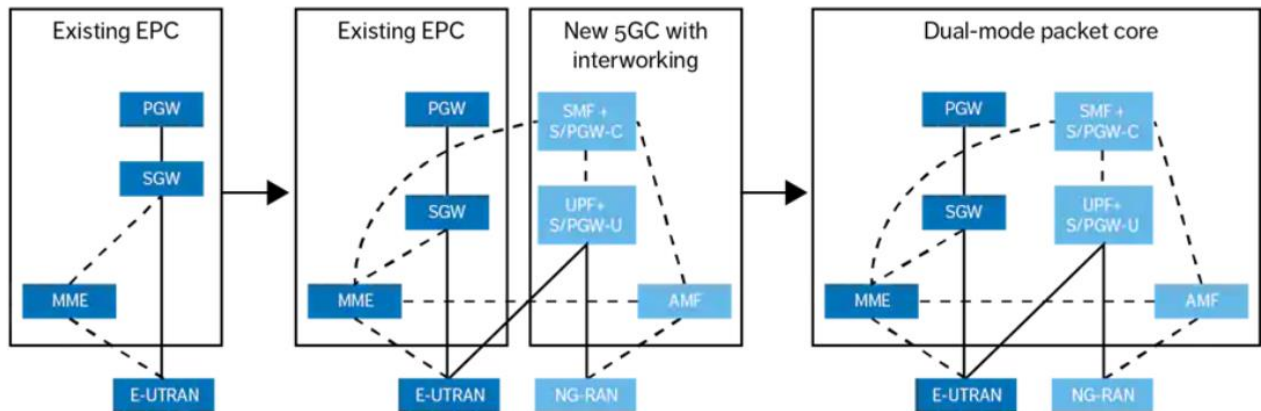


Рис. 3.3 Перехід від EPS до 5GS з використанням тісної взаємодії EPC-5GC

У середній частині рисунку 3.3 також показано, що можна продовжувати використовувати існуючі функції SGW і PGW в EPC для застарілих пристроїв з підпискою тільки на 4G при впровадженні 5GC, що мінімізує вплив на існуючі послуги і абонентів. Однак MME повинен підтримувати вибір шлюзу (SGW-C і SMF + PGW-C) для пристроїв з підпискою 5GC і можливістю 5GC-NAS (рівень без доступу). Останнє передається як частина процедури поновлення / приєднання області відстеження в EPS. MME також може використовувати додаткові методи для допомоги у виборі шлюзу, такі як виділені імена точок доступу або удосконалення пошуку в системі доменних імен. MME може також знадобитися підтримувати обмеження, наприклад, якщо оператор хоче обмежити мобільність для 5GS для певних телефонних номерів.

Наступним етапом міграції є об'єднання усіх функцій EPC і 5GC в дворежимне пакетне ядро, яке обслуговує абонентів з підтримкою 5G

незалежно від використовуваної технології доступу і користувачів 4G, які підключаються тільки через EPC, як показано на правій стороні рис. 3.3. У цьому прикладі нові пристрої 5GC обслуговуються SMF + PGW-C, тоді як застарілі пристрої тільки для 4G як і раніше обслуговуються окремим екземпляром PGW. Можливі й інші моделі розгортання.

Таким чином, метою міграції є рішення, яке дотримується принципів загальної операційної моделі, заснованої на хмарній реалізації, і пропонує свої переваги як новим абонентам з підтримкою 5G незалежно від використовуваної технології доступу, так і користувачам 4G, які підключаються тільки через EPC.

При впровадженні 5GS також важливо враховувати майбутні послуги крім MBW. Один із способів забезпечити відповідність мережевої архітектури вимогам завтрашнього дня - це підтримка поділу мережі. У цьому контексті всі функції, необхідні для підтримки MBW і необхідні для управління доступом і мобільністю, управління сеансами і UP (SMF + PGW-C і UPF + PGW-U), є частиною мережного сегмента MBW. Отже, один мережевий сегмент може використовуватися як для доступу в Інтернет, так і для передачі голосу IMS та інших послуг IMS. Таке розташування може зберігатися, коли пристрій запускається на EPC і переходить на 5GC, або навпаки.

Домен сервісів

Незалежно від технології доступу очікується, що підтримка голосового зв'язку IMS, служб екстреної допомоги та SMS буде без проблем працювати всюди, де абоненти можуть підключитися до мережі. Телефон не вибиратиме доступ NR SA, якщо він не виявить голосовій службі IMS. Послуги голосового зв'язку і служби екстреної допомоги підтримуються спеціальними можливостями в RAN і Packet Core, які повинні бути надані об'єднаним EPS і 5GS після міграції. IMS необхідно оновити для підтримки NR SA.

Відкат EPS можна використовувати в якості першого кроку міграції голосового зв'язку при впровадженні 5GS в розгортанні, де покриття NR має базове покриття LTE / EPC. Відкат EPS означає, що пристрій переміщається в EPS при встановленні виклику. Зазвичай він використовується до розгортання всіх голосових можливостей у NR або до того, як RAN буде виміряна і налаштована для передачі голосу.

Подальший перехід голосового зв'язку з резервної передачі EPS на передачу голосу по NR досягається за рахунок дозволу встановлення голосових викликів на NR, підключеному до 5GC, замість виконання відкату EPS при встановленні виклику. Цей крок міграції може бути виконаний після того, як всі необхідні можливості передачі голосу по NR будуть реалізовані в пристрої і мережі, а RAN буде розрахована і налаштована для передачі голосу. Однак пристрої, представлені до цього кроку, залишаються в поле, коли буде введена передача голосу по NR, тому мережа повинна підтримувати передачу голосу по NR, включаючи відкат EPS.

Що стосується екстрених служб, 3GPP визначив різні методи для екстрених викликів в 5GS. Наприклад, використання запиту на обслуговування для виконання відкату EPS для екстрених викликів є можливим першим кроком переходу. Перевага цього підходу полягає в тому, що він впливає тільки на AMF і gNB і дозволяє уникнути нормативних вимог до 5GS, що стосуються екстрених викликів. Для переходу на режим екстреного виклику через NR необхідно виконати всі нормативні вимоги, що стосуються екстрених викликів. Оператори повинні вирішити, чи слід починати з запиту на обслуговування в екстрених випадках або використовувати екстрений виклик за NR безпосередньо.

SMS продовжує залишатися важливою послугою в 5GS. Існує два основні методи передачі SMS в комбінованих 5GS і EPS: SMS-over-IP (SMSoIP) з

використанням повідомлення IMS SIP (Session Initiation Protocol) і SMS-over-NAS (SMSoNAS) з використанням сигналізації NAS. Останній використовує 5G NAS, коли пристрій знаходиться в 5GS і 4G NAS, коли в EPS. Оператори, які використовують SMSoNAS для пристроїв в EPS, переходять на підтримку SMSoNAS в 5GS. Оператори, які вже використовують SMSoIP в EPS, можуть продовжувати підтримувати SMSoIP через 5GS.

Крім MBB, 5G також включає безліч нових і розширених можливостей, призначених для багатьох різних бізнес-сегментів. Важко передбачити, які з цих можливостей будуть потрібні на початковому етапі впровадження 5GS, і відповідь може відрізнятись для різних операторів. Прикладами часто згадуваних можливостей для глобальних послуг є автомобільна промисловість [5], інтелектуальні мережі для комунальних служб і громадська безпека.

Всі ці варіанти використання використовуватимуть встановлений масштаб 5GS MBB і нарощування глобальної мережі, особливо якщо при впровадженні 5GS заплановані деякі ключові архітектурні концепції. До них відносяться такі технології, як поділ мережі, периферійні обчислення і розкриття мережі [6], для яких необхідна функціональність вже вбудована з самого початку. Ці технології 5GS також є ключовими інструментами для розгортання локальних мереж в лікарнях, портах, аеропортах і на виробничих підприємствах [7].

3.2. Подвійне-підключення LTE-5G

3.2.1. Сигналізація управління

Перша спроба описати архітектуру LTE-5G з контрольної точки зору була зроблена в [52]. У цьому документі, який є вихідною точкою даної дипломної роботи, розглядаються різні аспекти інтегрованої системи LTE-5G, такі як:

- управління сигналізацією та координація між LTE і 5G;
- опорні звукові сигнали 5G з аналізом різних альтернатив.

UE, як правило, знаходиться в межах досяжності LTE eNB, який позначається як головний стільник, відповідно до термінології 3GPP. Цей стільник може виступати координатором для стільників mmWave, які знаходяться під його покриттям, але координатор може бути розміщений також в іншому вузлі всередині базової мережі (за умови, що він знаходиться досить близько до краю). Стільники mmWave діють як вторинні стільники і обмінюються інформацією управління з координатором через інтерфейс X2.

Однією з основних функціональних можливостей цієї архітектури є повідомлення про якість сигналу лінії mmWave координатору, який вибирає найкращу соту mmWave, до якої UE має підключатися. Зокрема, очікується, що UE та eNB, що підтримують mmWave, будуть використовувати фазові масиви спрямованості для формування променя. Тому кожен вузол вибирає певну кількість напрямків або секторів (NUE для UE та NeNB для eNB). Міра якості сигналу необхідна для кожної пари напрямків UE-eNB, загалом це $NUE \times NeNB$ вимірювань на UE, враховуючи всі mmWave eNB в межах досяжності. Потім про ці заходи повідомляється координатору у пункті процедури, яка працює наступним чином:

1. UE передає опорний сигнал для кожного з напрямків NUE, змінюючи сектор при кожній передачі. Опорний сигнал відомий eNB і може використовуватися для оцінки каналу. Якщо використовується аналогове формування променя, кожна mmWave eNB або сканує свої сектори NeNB по одному, або, якщо застосовується цифрове формування променя, збирає виміри від усіх їх одночасно. ENB mmWave заповнює таблицю звітів (RT) з дисперсією SINR та SINR для кожного UE у кожному напрямку та надсилає її координатору;

2. Координатор може створити повну таблицю звітів (CRT) для кожного UE, враховуючи інформацію, що надходить від усіх eNB mmWave. Потім

вибирається оптимальний eNB і напрямок для кожного UE з урахуванням SINR для кожної пари (mmWave eNB, напрямок);

3. LTE eNB (навіть якщо він не виконує функцію координатора) звітує перед UE, яка з пар (mmWave eNB, напрямок) забезпечує найкращі показники. Вибір використання каналу керування LTE мотивований тим фактом, що UE може не зможти приймати з оптимального посилення mmWave, якщо воно не налаштоване належним чином. Крім того, ланка управління LTE пропонує більш високу стабільність і надійність.

Існує необхідна затримка для збору всіх вимірювань для UE, як описано в [52]. Період передачі опорного сигналу визначається як T_{per} , і кожен сигнал триває T_{sig} . Припустимими значеннями є $T_{per} = 200$ мкс і $T_{sig} = 10$ мкс, щоб підтримувати накладні витрати 5%. Процедура вимірювання для кожного UE вимагає сканування $NeNB \cdot N_{UE} / L$, причому L - кількість одночасних напрямків, з яких приймач може приймати. Наприклад, з аналоговим формуванням променя $L = 1$, тоді як для eNB (UE) з цифровим формуванням променя $L = NeNB$ ($L = N_{UE}$) відповідно. Тому затримка буде:

$$D = \frac{NeNB \cdot N_{UE} \cdot T_{per}}{L} \quad (3.1)$$

У таблиці 3.1 подано затримку для різних конфігурацій системи з $N_{UE} = 8$ і $NeNB = 16$ для опорних сигналів на основі висхідної лінії зв'язку.

Таблиця 3.1

Затримка, необхідна для збору вимірювань для кожного UE, на кожному eNB міліметрової хвилі, для $T_{\text{ref}} = 200$ мкс, $N_{\text{UE}} = 8$, $N_{\text{eNB}} = 16$

Архітектура BF		Затримка, D
Сторона eNB	Сторона UE	
Аналоговий	Аналоговий	25.6 мс
Аналоговий	Цифровий	25.6 мс
Цифровий	Аналоговий	1.6 мс
Цифровий	Цифровий	1.6 мс

Після того, як звіт буде зроблений, UE повинен виконати початковий доступ до mmWave eNB або передачу обслуговування від mmWave eNB до нового.

Зверніть увагу, що модуль NYU mmWave не реалізує жодну передачу звукового опорного сигналу, але при призначенні радіоресурсів він враховує накладні витрати, які він генерує. Для того, щоб мати можливість обчислити SINR в mmWave eNB, можна використати гнучкість, яку надає той факт, що NS – 3 є симулятором, а не фактичною реалізацією.

3.2.2. Реалізація подвійного підключення

В попередніх розділах детально розглянуто, який з рівнів може бути використаний, як рівень інтеграції. В даній роботі рівнем інтеграції обрано рівень PDCP. Він був обраний виходячи з таких міркувань:

1) *Розгортання не в одному місці*. По-перше, синхронізація не потрібна, і тому розгортання стеку, який не розташований в одному місці, можливе. Оскільки очікується, що стільники mmWave матимуть радіус покриття не більше 200 м, вони будуть розгорнуті з щільністю, вищою, ніж щільність стільників LTE (які вже встановлені) [15]. Встановлення LTE та mmWave eNB на кожному новому сайті було б дорогим. Більше того, висока щільність LTE

eNB передбачає меншу площу покриття для кожного з них, щоб уникнути міжстільникових перешкод. Однією з основних особливостей жорсткої інтеграції LTE-5G є великий рівень покриття, який може забезпечити макросота LTE. Якщо площа кожної комірки LTE зменшиться до такої ж, як у комірок mmWave, тоді шар покриття не буде ефективним. Більше того, рівень PDCP може бути переміщений в базову мережу, у новий вузол координатора, який може виступати в ролі шлюзу для групи LTE eNB та eNB mmWave під їх покриттям, або може бути розгорнутий у макро LTE eNB.

2) *Відсутність дизайнерських обмежень для шарів 5G PHY для RLC.* Друге - це можливість проектування стеку протоколу mmWave 5G від рівня PHY до рівня RLC без обмежень, передбачених уже стандартизованими протоколами LTE. Це дозволяє мати чіткий підхід, який може допомогти задовольнити вимоги до продуктивності 5G та вирішити проблеми mmWave. Наприклад, схема TDD може бути використана на рівнях PHY та MAC, оскільки це сприяє зменшенню затримки радіодоступу [49]. Наприклад, якщо інтеграція виконується на рівні MAC або PHY, дуплекс повинен бути однаковим для LTE та mmWave 5G, і більшість вже розгорнутих мереж LTE використовують FDD.

3) *Легке та просте рішення.* Третє - рішення про подвійне підключення на рівні PDCP - це просте та економне рішення. Якщо інтеграція відбудеться на рівні RLC, процес повторної збірки на приймачі буде уповільнений тим фактом, що відправка фрагментів по повітряному (бездротовому) інтерфейсу LTE має більшу затримку, ніж в mmWave, і тому останній повинен залишитися в буфері і зачекати LTE RLC PDU з відсутніми фрагментами. Натомість на рівні PDCP не виконується фрагментація / повторне збирання. Однак рівень PDCP може відкидати пакети через таймаут: для запобігання цій проблемі тайм-аут повинен бути встановлений досить високим.

На рис. 3.4 показана блок-схема запропонованої архітектури. Зверніть увагу, що вона нагадує варіант 3С зі звіту 3GPP [42], але є деякі відмінності, які будуть описані в наступних розділах.

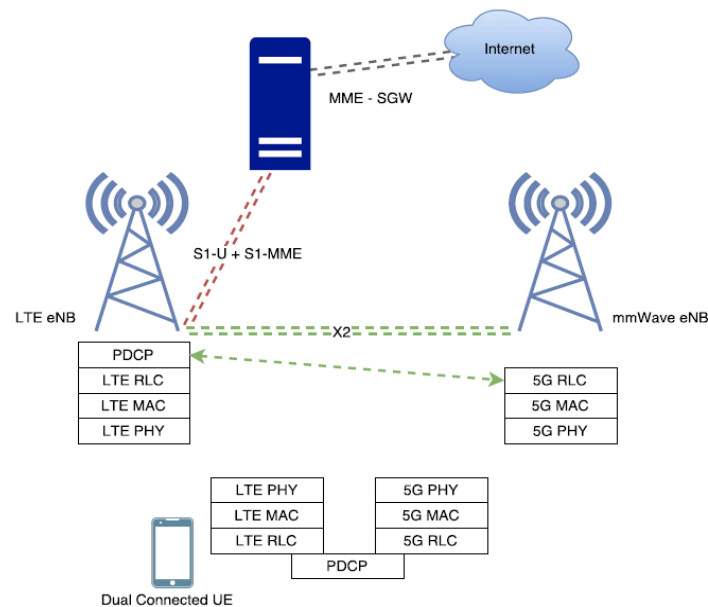


Рис. 3.4 Архітектура тісної інтеграції LTE-5G

Клас McUeNetDevice

Ядром реалізації подвійного підключення є клас McUeNetDevice. Це підклас NS – 3 NetDevice, який є базовим класом, який абстрагує мережеві пристрої та забезпечує інтерфейс між верхніми шарами стеку TCP / IP та власними нижніми рівнями. Зокрема, модуль LTE розширює цей клас за допомогою LteUeNetDevice та LteEnbNetDevice, те саме робиться в модулі mmWave. NetDevice містить покажчики на власні класи стеків нижнього рівня та має метод Send, який пересилає пакети до стеку TCP / IP. Як в модулі LTE, так і в mmWave цей метод пов'язаний із зворотним викликом у DoRecvData класу EpcUeNas, який, як визначено стандартом LTE, діє як зв'язок між стеком протоколів LTE та стеком TCP / IP.

McUeNetDevice представляє UE з однією EpcUeNas, але з подвійним стеком від цього рівня вниз, а базову діаграму UML можна побачити на рис. 3.5: є mmWave PHY, MAC і RRC рівні, а також LTE PHY, MAC, RRC рівні. Рівень EpcUeNas має інтерфейс до обох об'єктів RRC і відповідає за обмін інформацією між ними.

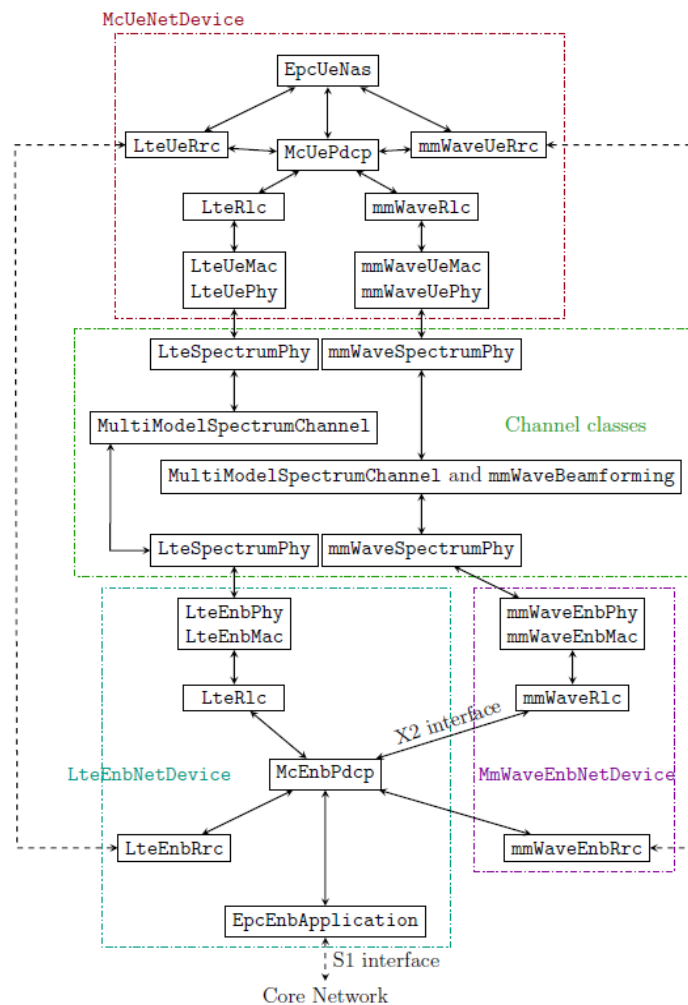


Рис. 3.5 Блок-схема багатозв'язного пристрою, LTE eNB і mmWave eNB

Цей клас можна використовувати для моделювання різних режимів подвійного підключення, тобто він може підтримувати як швидке

переключення, так і орієнтоване на пропускну здатність подвійне підключення, згідно з яким реалізовані процедури RRC та X2 та примітиви.

Кожен фізичний рівень двох стеків використовує відповідну модель каналу mmWave або LTE. Зверніть увагу, що оскільки дві системи працюють на різних частотах, моделювання перешкод між двома RAT не потрібне. Тому кожна з двох моделей каналів може бути налаштована незалежно.

Для того, щоб використовувати McUeNetDevice як мобільний термінал в моделюванні, до допоміжного класу модуля mmWave було додано кілька функцій:

- можливість створення каналу LTE;
- спосіб встановлення та налаштування LTE eNB, щоб їх можна було підключити до стеку LTE McUeNetDevice;
- методи встановлення McUeNetDevice та підключення його рівнів, як показано на рис. 3.5.

Подвійно підключений рівень PDCP

Як згадувалося в попередньому розділі, реалізація рівня PDCP у ns – 3 виконує лише основні функції. Для підтримки подвійного підключення клас LtePdcп був розширений класами McEnbPdcп та McUePdcп, відповідно на стороні eNB та на стороні UE.

McUePdcп просто додає до реалізації рівня PDCP другий інтерфейс до нижчого рівня RLC, зберігаючи інтерфейс LteRlcSapProvider, запропонований RLC mmWave. Потім, коли пакети повинні надсилатися на mmWave (LTE) RAT, PDCP використовує RW-інтерфейс mmWave (LTE).

Натомість реалізація McEnbPdcп та віддаленого RLC на mmWave eNB вимагала нових інтерфейсів до методів класу EpcX2:

- EpcX2PdcSapProvider пропонує метод SendMcPdcPdu, який PDCP може викликати для надсилання PDU на віддалений рівень RLC за допомогою інтерфейсу X2;
- EpcX2PdcSapUser пропонує метод ReceiveMcPdcPdu, який клас EpcX2 може викликати для переадресації на PDCP пакет, отриманий від віддаленого RLC;
- EpcX2RlcSapProvider має метод ReceiveMcRlcSdu, який конкретна реалізація RLC вимагає відправити пакет, отриманий з нижчих шарів, на віддалений PDCP через X2;
- EpcX2RlcSapUser має метод SendMcRlcSdu, який використовується класом, що реалізує інтерфейс X2, для переадресації пакетів на рівень RLC в mmWave eNB, як тільки він отримав їх від LTE eNB.

Основна схема інтерфейсів та методів показана на рис. 3.6. McEnbPdcp та екземпляр віддаленого RLC зберігають LTE eNB та ідентифікатори комірок mmWave eNB, а також ідентифікатор тунельного GTP для передачі на інтерфейсі X2.

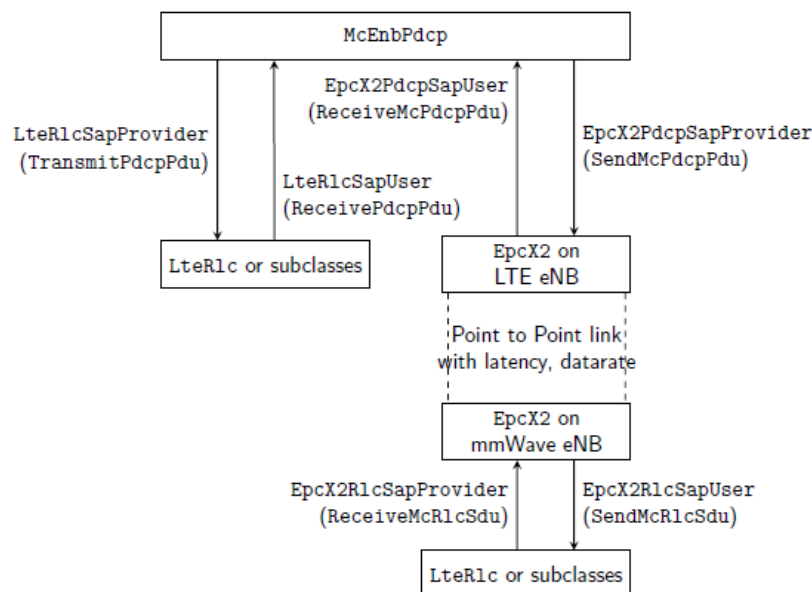


Рис. 3.6 Відносини між PDCP, X2 і RLC

Рівень RRC

У цьому розділі будуть описані функції, додані до рівня RRC. На відміну від запропонованого в [42] для подвійного підключення 3С, обидва eNB мають рівень RRC. У той же час UE має рівень RRC для обох стеків протоколів. Це дозволяє досягти більшої гнучкості, оскільки нові можливості можуть бути додані до протоколу RRC для RAT mmWave. Більше того, LTE RRC використовується для управління з'єднанням LTE і для обміну командами, пов'язаними з подвійним підключенням, тоді як mmWave RRC використовується для управління тільки зв'язками, пов'язаними з mmWave, а також для збору вимірювань в eNB mmWave і звітування перед координатором. Для того, щоб мінімізувати зв'язок по лінії RMC mmWave, LTE RRC також відповідає за обробку об'єктів RLC і PDCP для обох RAT. Використовуючи виділену RRC-лінію, вторинний eNB уникає кодування та передачі керуючого PDU в головний стільник, тому зменшується затримка команд управління. Радіосигнали mmWave сигналізації використовуються лише тоді, коли з'єднання з LTE вже встановлено, і це може запропонувати готову резервну копію на випадок, якщо зв'язок mmWave зазнає відключення. Нарешті, лише LTE eNB (або координатор) повинен взаємодіяти з основною мережею при роботі з подвійними підключеними пристроями, виконуючи роль площини даних та якоря мобільності для UE. Це дозволяє зменшити кількість з'єднань, необхідних для MME, але збільшує обчислювальне та мережеве навантаження LTE eNB (або координатора).

Збір вимірювань з mmWave eNBs

Додано новий примітив X2 для передачі звітів з вторинних eNB до головних комірок. Кожен звіт організований, як на рис. 3.7. Зверніть увагу, що, оскільки формування променя mmWave NYU завжди передбачає, що між UE та mmWave eNB є ідеальне вирівнювання, і що вимірювання спрямованості ще не

виконуються, повідомляється SINR, який відповідає оптимальному напрямку, а не SINR для кожного напрямку eNB.

RT for mmWave eNB i	
UE imsi 1	SINR $\Gamma_{i,1}$
UE imsi 2	SINR $\Gamma_{i,2}$
\vdots	\vdots
UE imsi N	SINR $\Gamma_{i,N}$

Рис. 3.7 Таблиця звітів для mmWave eNB i . Для кожного UE є запис, кожен запис являє собою пару з IMSI UE і SINR Γ , вимірюваними в кращому напрямку між eNB і UE

Коли LTE RRC отримує нову таблицю звітів, вона оновлює відповідні записи CRT. Приклад CRT наведено на рис. 3.8. Зверніть увагу, що ця CRT є простішою, ніж у [52], оскільки дисперсія та спрямованість не враховуються.

	eNB 1	eNB 2	...	eNB M
UE imsi 1	SINR $\Gamma_{1,1}$	SINR $\Gamma_{2,1}$...	SINR $\Gamma_{N,1}$
UE imsi 2	SINR $\Gamma_{1,2}$	SINR $\Gamma_{2,2}$...	SINR $\Gamma_{N,2}$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
UE imsi N	SINR $\Gamma_{1,N}$	SINR $\Gamma_{2,N}$...	SINR $\Gamma_{N,N}$

Рис. 3.8 Повна таблиця звітів доступна на LTE eNB (або у координатора). Існує запис для кожного UE в кожному eNB mmWave, кожен запис являє собою пару з IMSI UE і SINR Γ , вимірюваними в найкращому напрямку між eNB і UE.

Після оновлення всіх записів у CRT LTE eNB вибирає, який найкращий стільник mmWave для кожного UE. Для підтримки швидкого перемикування він також виявляє, коли потрібен перехід на LTE, тобто коли SINR лінії mmWave занадто низький, щоб використовувати для передачі даних. Той самий критерій

використовується для ініціювання передачі з mmWave на LTE у базовому сценарії жорсткої передачі.

Нові структури даних

Для підтримки подвійного з'єднання необхідно внести деякі зміни в рівень RRC головного eNB, вторинного eNB та UE, а також додати деякі команди протоколу X2 та RRC. Ці зміни охоплюють нові структури даних та нові процедури передачі сигналів.

LteEnbRrc має приватну змінну, яка відображає екземпляри UeManager до кожного UE C-RNTI. Кожен об'єкт UeManager представляє UE, яке відоме eNB, і зберігає:

- стан UE RRC;
- карту об'єктів LteDataRadioBearerInfo, які абстрагують інформацію, пов'язану з EPS Data Radio Bearers (і містять також вказівники на об'єкти RLC та PDCP), як показано на рис. 3.9;
- вказівник на LteSignalingRadioBearerInfo для SRB0 та SRB1;
- конфігурації imsi, rnti та X2;

Та сама інформація присутня у класі LteUeRrc, поряд із CellId поточної комірки.

Для підтримки подвійного підключення UeManager знає, чи є UE подвійним підключеним пристроєм чи ні, і чи є клас LteEnbRrc, до якого він належить, LTE або mmWave, таким чином, якщо він розміщений у координаторі або в віддалений eNB, де для кожного носія потрібно керувати лише суттю RLC. UeManager подвійного підключеного пристрою, який зберігається в eNB mmWave, також містить карту об'єктів RlcBearerInfo.

Ще однією структурою, яка додається до LteEnbRrc, є карта кінцевих точок X2 для пристроїв з подвійним підключенням, так що при отриманні

пакету на інтерфейсі X2 він пересилається на правильний RLC, PDCP або UeManager.

Нарешті, іншими структурами даних, доданими до LteEnbRrc, є ті, що потрібні для управління таблицями звітів та повними таблицями звітів. Це карти, які для кожного підключеного UE, відомого LTE eNB, зберігають наступну інформацію за допомогою imsi:

- поточний eNB mmWave, до якого підключено UE;
- найкращий mmWave eNB для певного UE;
- чи використовує UE LTE або стек mmWave;
- карта SINR UE в кожному eNB mmWave.

Нові процедури сигналізації

Нові процедури сигналізації передбачають:

- початковий подвійний підключений доступ;
- передача даних для вторинних комірок;
- перемикання з двох RAT.

У [52] є пропозиція щодо ІА для подвійних підключених пристроїв, однак вона не стосується налаштування віддалених носіїв. Тому процедура ІА розширена для того, щоб завершити налаштування віддаленого рівня RLC в eNB mmWave та пов'язаного RLC в UE, а також закінчити ІА перемиканням на mmWave RAT. Повна процедура показана на рис. 3.9.

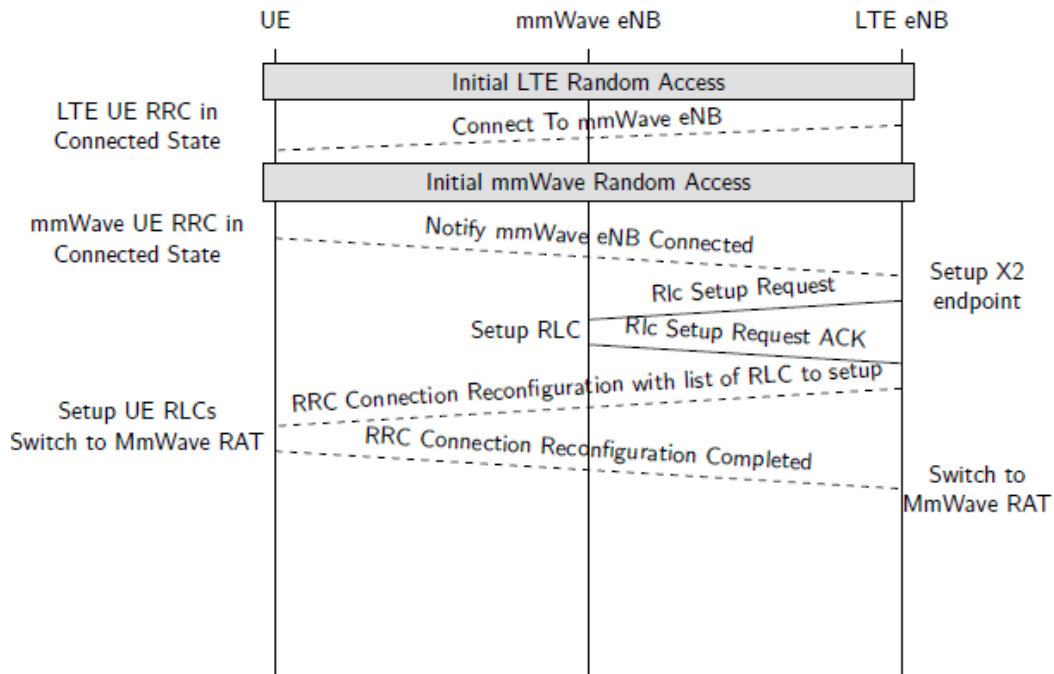


Рис. 3.9 Початковий доступ для пристроїв з подвійним підключенням і настройка mmWave RLC. Пунктирні лінії - повідомлення RRC, суцільні лінії - повідомлення X2.

Натомість на рис. 3.10 показана процедура хендоверу між вторинними стільниками mmWave. По-перше, LTE RAT продовжує використовуватися, щоб забезпечити безперервність обслуговування під час вторинного хендовера. Потім відбувається передача між двома комірками mmWave. Зверніть увагу, оскільки в eNB mmWave не встановлено радіоносіїв, запит на передачу даних та реконфігурація підключення RRC PDU мають менший розмір, ніж ті, що використовуються під час класичної передачі. Після завершення цієї процедури LTE RRC використовується для передачі сигналу LTE eNB про те, що вторинний mmWave eNB доступний, після чого LTE eNB запускає процедуру налаштування віддалених RLC. Інша відмінність від класичного хендовера полягає в тому, що базова мережа не задіяна, тобто повідомлення про зміну

шляху, яке класична процедура хендвера повинна надіслати в ММЕ, не потрібне, оскільки носій має єдину кінцеву точку в LTE eNB.

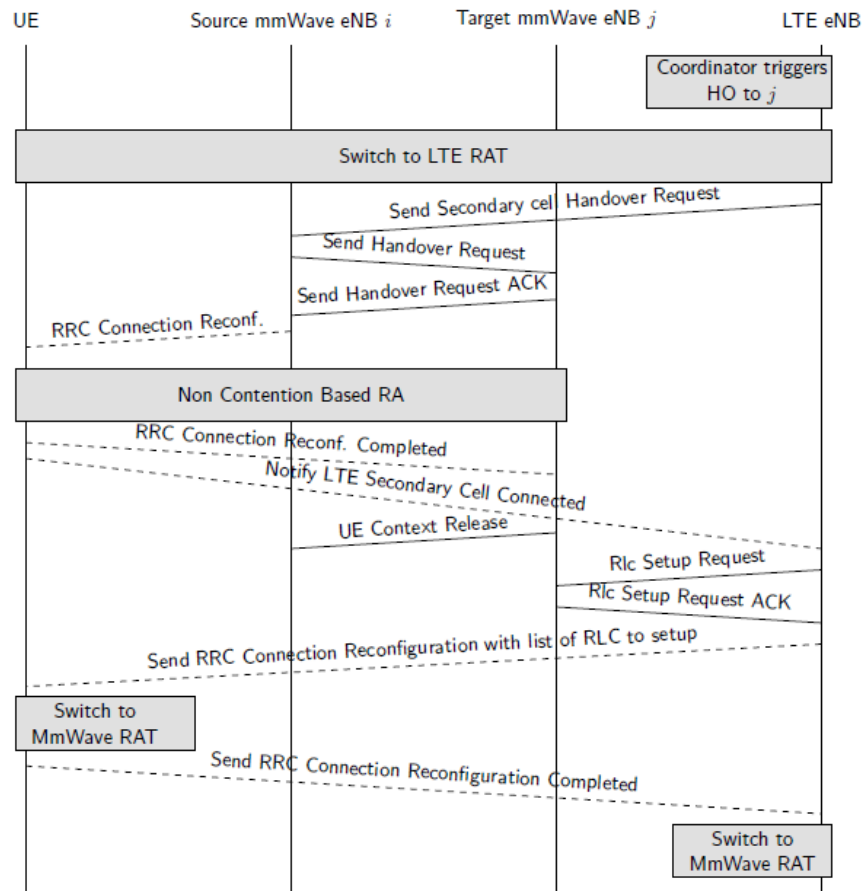


Рис. 3.10 Процедура хендверу між вторинними стільниками

Нарешті, на рис. 3.11 показано повідомлення, якими обмінюються для переключення з LTE на mmWave і навпаки.

Для підтримки цих процедур визначаються нові PD2 X2 та RRC, а також заголовки, інформаційні елементи яких кодуються відповідно до стандартних вказівок LTE.

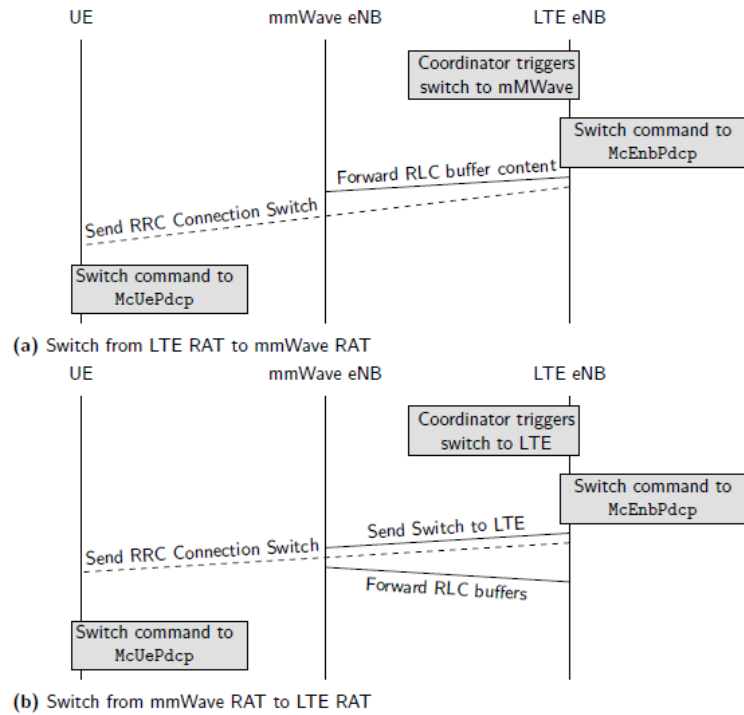


Рис. 3.11 Переключення з mmWave RAT на LTE RAT

3.2.3. Реалізація хендоверу

Жорсткий хендовер

Передача даних на основі X2 вже реалізована в модулі ns – 3 LTE, але вона не підтримувалася модулем NYU mmWave. Тому код класів LTE був інтегрований у mmWave, зокрема перенесені основні функції:

- X2 пов'язує eNB mmWave, розширюючи допоміжний модуль mmWave;
- Випадковий доступ без конфліктів, який реалізований у класах MAC та RRC LTE, але відсутній у MAC mmWave.

Потім також додаються зв'язки X2 між eNB mmWave та eTB LTE. Отже, передача також приймає легку форму координації, і вона моделюється як внутрішня передача в RAT, а не як передача між RAT. Цей вибір був зроблений для того, щоб зосередити порівняння на фактичній різниці між процедурою передачі та процедурою швидкого перемикавання, враховуючи ті самі правила перемикавання / передачі та набір вимірювань.

Клас McUeNetDevice є основою також для пристроїв, здатних на передачу даних між eNB LTE та mmWave. Однак, на випадок подвійного підключення, в UE використовується один RRC. Цей рівень має інтерфейси як для LTE, так і для класів mmWave PHY та MAC, але одночасно використовується лише один із двох стеків. Коли UE RRC отримує команду передачі на певний цільовий eNB, він перевіряє, чи є це LTE або сота mmWave. Наприклад, якщо він підключений до соти mmWave (і, таким чином, використовує інтерфейси до рівнів mmWave PHY та MAC) і отримує команду передачі в комірку LTE, він скидає рівні PHY та MAC mmWave, замінює інтерфейси і починає використовувати стек LTE. Це дозволяє моделювати хендовер серед RAT, зберігаючи при цьому єдиний RRC з постійним станом щодо eNB, до яких він підключений, і до MME, який контролює його мобільність в базовій мережі.

Хендовер без втрат та передача буферу RLC

Особливістю, якої не було в модулі LTE ns – 3, є передача без втрат. Спроба її реалізації була зроблена в [53].

Основне завдання полягає в тому, щоб відновити сегментовані пакети в повторній передачі AM RLC і переданих буферах, щоб пересилати цільовим eNB вихідні SDU PDCP. Рішення, прийняте в [53], полягає в повторному використанні алгоритму повторної збірки, що надається класом RLC AM. Першим кроком є об'єднання вмісту буферів передачі і повторної передачі з використанням порядкових номерів заголовків. Потім новий об'єднаний буфер передається алгоритму повторної збірки. Нарешті, SDU PDCP пересилаються на цільової eNB до пересилання будь-якого іншого вхідного пакета.

Реалізація передачі даних [53] без втрат була перенесена на модуль mmWave і пристосована для використання для передачі обслуговування між LTE та 5G. Більш того, ті самі методи використовуються при виконанні швидкого переключення.

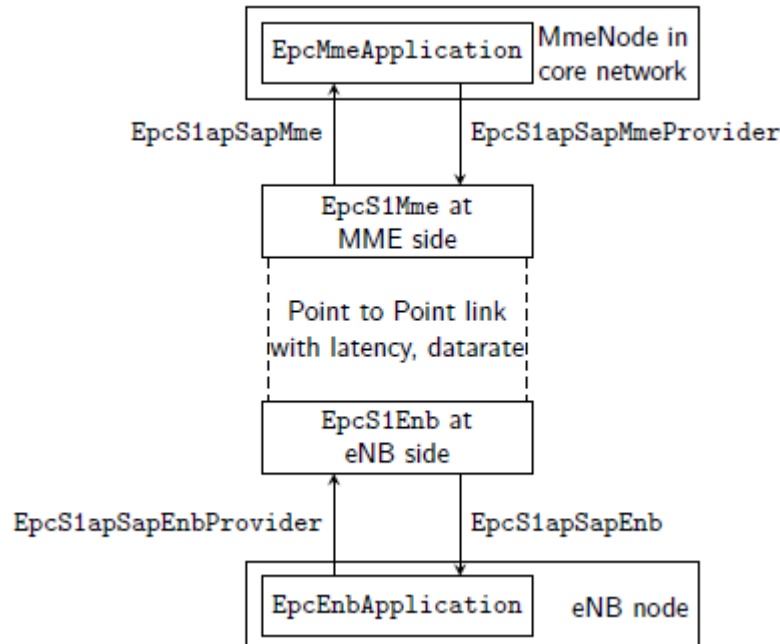


Рис. 3.12 Відносини між ММЕ і еNB

3.2.4. Інтерфейс S1-AP і реалізація вузла ММЕ

ММЕ не моделюється як реальний вузол у мережі EPC. ММЕ використовується під час хендовера, як показано на рис. 3.12, і він отримує повідомлення від цільового eNB за допомогою команди перемикавання шляху. Потім він оновлює інформацію про UE при передачі в ММЕ і S-GW, так що пакети пересилаються до правильного eNB. Нарешті, він відповідає повідомленням про підтвердження перемикача шляхів. Отже, поки ММЕ не отримає перемикач шляху, пакети переадресовуються від базової мережі до вихідного eNB, а потім до цільового eNB.

Для того, щоб змоделювати ефективність хендовера більш реалістичним чином, до реалізації базової мережі додається реальний інтерфейс між ММЕ та eNB. Зокрема, клас EpcMme модуля LTE модифікується у додаток (EpcMmeApplication), який встановлюється на ns – 3 вузол (MmeNode). Потім ця програма взаємодіє з кінцевою точкою S1-MME в ММЕ. Це пов'язано із зв'язком точка-точка з іншою кінцевою точкою в eNB, яка пов'язана із додатком EpcEnbApplication.

Класи EpcS1Mme та EpcS1Enb отримують SDU від MME і eNB, відповідно, і створюють PDU, які можуть надсилатися через S1, кодуючи інформаційні елементи та додаючи заголовок S1-AP2. Оскільки в модулях ns – 3 LTE та mmWave потрібна не вся сигналізація, пов'язана з MME (тобто без підкачки, без оновлення області відстеження), підтримується лише підмножина можливих S1-AP PDU. Зокрема, від eNB до MME повідомлення йдуть такі:

- Початкове повідомлення UE, яке надсилається, коли UE виконує свій перший довільний доступ;
- Запит на зміну шляху, який надсилається в кінці передачі;
- Індикація випуску радіодоступу E-UTRAN (E-RAB);

тоді як від MME до eNB:

- Початковий запит на встановлення контексту з інформацією, що стосується носіїв UE;

Запит на перемикання шляхів ACK, щоб сигналізувати про те, що перемикання в MME та S-GW відбулося успішно.

3.3. Моделювання та аналіз ефективності

3.3.1. Сценарій моделювання. Припущення симуляції.

Симуляції, які будуть описані в цій главі, використовують симулятор ns – 3, описаний у вище з додатковими функціями, доданими в попередньому розділі. Тому будуть використовуватися опорні сигнали на основі UL для стільників mmWave з цифровим формуванням променя на стороні eNB.

Довідковий сценарій представлений на рис. 3.13 Це типова міська сітка, є 4 будівлі, кожна з яких заввишки 15 метрів. ENB mmWave розташовані на двох вулицях вздовж осі y на висоті 10 метрів. На початку моделювання, UE знаходиться на координатах (100, –5). Потім вона рухається вздовж осі x на швидкості s m/s, доки вона не прийде в положення (300, –5). Метою моделювання є перевірка продуктивності системи за сценарієм, коли UE

знаходиться далеко від mmWave eNB і відчуває відключення. Тривалість моделювання τ залежить від швидкості UE s і, зокрема, задається формулою:

$$\tau = \frac{l_{path}}{s} \quad (3.2)$$

де $l_{path} = 200$ m - довжина шляху UE

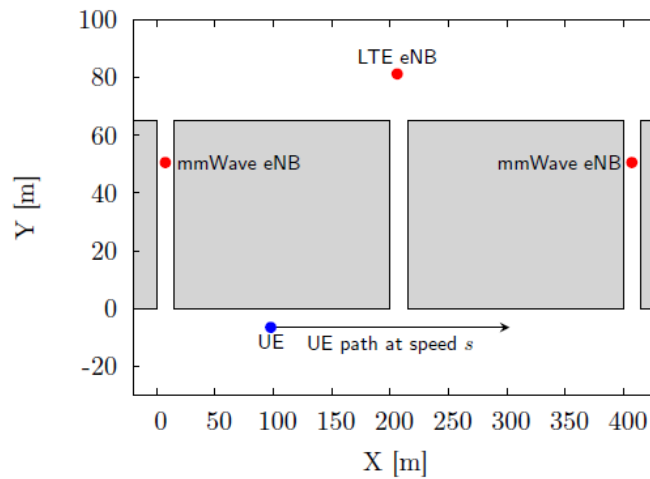


Рис. 3.13 Сценарій моделювання. Сірі прямокутники - це будівлі

Параметри і процедури моделювання

Параметри структури кадру OFDM однакові з таблицею 2.2. Додаткові параметри зведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Параметри симуляції

Параметр	Значення	Опис
mmWave BW	1 GHz	Смуга пропускання eNB mmWave
mmWave f_c	28 GHz	Частота несучої mmWave
mmWave UL-DL P_{tx}	30 dBm	Потужність передачі mmWave
LTE BW	20 MHz	Пропускна здатність LTE eNB
LTE f_c	2.1 GHz	Несуча частота в низхідній лінії зв'язку LTE
LTE DL P_{tx}	30 dBm	Потужність передачі для низхідної лінії зв'язку LTE
LTE UL P_{tx}	23 dBm	Потужність передачі для висхідної лінії зв'язку LTE
F	5 dB	Коефіцієнт шуму
Δ_{LTE}	-5 dB	Поріг перемикання / хендовера на LTE
Δ_{hys}	3 dB	Гістерезис перемикання
mmWave eNB antenna	16x16 ULA	
mmWave UE antenna	8x8 ULA	
s	{2, 4, 8, 16} m/s	Швидкість UE
B_{RLC}	{1, 10, 100} MB	Розмір буферу RLC
λ	{20, 40, 80, 160} μs	Час між прибуттям пакетів UDP
$DX2$	{0.1, 1, 10} ms	Одностороння затримка на каналах X2
$DMME$	10 ms	Одностороння затримка MME
N	10	Ітерації по набору параметрів

Метою цих моделювань є оцінка різниці у швидкодії між швидким переключенням та встановленням жорсткого хендовера. Моделювання виконується з двома різними RLC, AM і UM, і для широкого набору параметрів.

Пропускна здатність LTE eNB є найбільшою, яку можна використовувати в системі LTE. Потужності передачі є типовими значеннями для розгортання LTE, тоді як очікувані UE та eNB mmWave використовують потужність передачі в діапазоні 20-30 дБм [4]. Показник шуму 5 дБ пояснює шум на стороні приймача.

Значення затримки до вузла MME (DMME) вибирається для моделювання як затримки розповсюдження до вузла, який зазвичай централізований і знаходиться далеко від мережі доступу, так і затримок обробки сервера MME.

Замість цього одностороння затримка інтерфейсу X2 коливається в межах $\{0,1, 1, 10\}$ мс, щоб зрозуміти залежність продуктивності системи від цього значення. Однак для практичних застосувань типова затримка становить близько 1 мс. Альянс мобільних мереж наступного покоління вимагає, щоб затримка в обидва кінці була менше 10 мс (тобто затримка в один бік 5 мс), і рекомендує значення в обидва кінці менше 5 мс [54].

Основні показники, які будуть зібрані, пов'язані з втратами пакетів UDP, затримкою на рівні RLC, пропускнуою здатністю PDCP та RRC і, нарешті, трафіком лінії X2. Для кожної з цих метрик буде досліджена залежність від параметрів моделювання. Враховується лише трафік низхідної лінії зв'язку.

3.3.2. Основні результати

Втрати пакетів

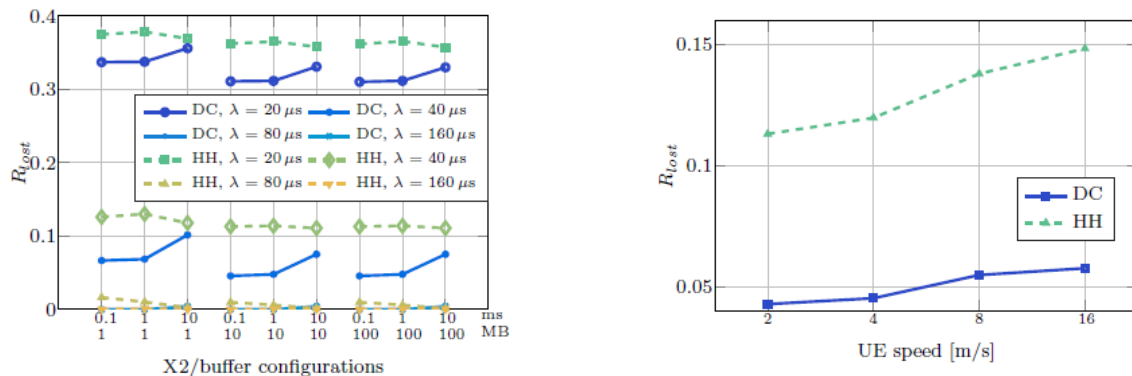
Першим елементом, який слід врахувати в цьому аналізі продуктивності, є кількість втрачених пакетів, тобто різниця між відправленими та отриманими пакетами, усереднена за N різних ітерацій для кожного набору параметрів.

На рис. 3.14 та 3.15 розглянутий показник - це відношення втрачених пакетів до загальної кількості відправлених пакетів. Оскільки джерело UDP постійно штовхає пакети до системи, з часом приходу λ , його можна обчислити як:

$$R_{lost} = 1 - \frac{\lambda}{\tau} r \quad (3.3)$$

де r - кількість прийнятих пакетів, а τ - тривалість моделювання.

На осі x рис. 3.14 і 3.15, існують різні пари (DX2, BRLC), де DX2 - затримка X2-зв'язків між eNB, а BRLC - розмір буфера передачі об'єктів RLC.



- а) Швидкість UE $s = 2$ м/с, $\lambda \in \{20, 40, 80, 160\}$ мкс
 б) R_{lost} як функція від швидкості UE, для $\lambda = 40 \mu s$, BRLC = 10MB, DX2 = 0.1ms

Рис. 3.14 Втрати пакетів UDP для моделювання з RLC AM

На рис. 3.14а перше, на що слід звернути увагу, це те, що при дуже малих інтервалах між приходами пакетів ($\lambda = 20$ мкс) мобільна мережа не може успішно доставити в UE стільки пакетів, скільки eNB отримують від базової мережі, і це спричиняє нестабільність системи з дуже високими втратами пакетів. Слід сказати, що:

- SNR зв'язків mmWave, як правило, є низьким у сценарії моделювання, тому слід використовувати низький MCS, і тому швидкість, пропонована в мобільній мережі, обмежена;

- сутності RLC мають обмежений розмір буфера BRLC, тобто пакети відкидаються, якщо буфер заповнений. Така поведінка для $\lambda = 20$ мкс не залежить від швидкості UE s , тому тенденції для $s \in \{4, 8, 16\}$ м / с є зайвими і не відображаються.

Друге зауваження, яке можна зробити, полягає в тому, що при використанні швидкого перемикачання втрачається менше пакетів. Оскільки кількість пакетів, відправлених в симуляції для $s = 2\text{m} / s$ і $\lambda = 80$ мкс становить порядку 10^7 , тоді довірчий інтервал при 95% для ймовірності втрат для $DX2 < 1$ мс буде $[0, 3 \cdot 10^{-7}]$, для рішення швидкого переключення.

Причиною такої поведінки є наступне. У змодельованому сценарії UE багато хендверів та / або комутаторів через простий алгоритм хендвера / комутатора та високу мінливість каналу mmWave. Розробка процедури LTE для передачі без втрат з RLC AM намагається мінімізувати втрати пакетів, але в екстремальному сценарії, як модельований, цього недостатньо. Є два елементи, які сприяють втратам:

- Перше, що слабо залежить від розміру буфера BRLC, полягає в тому, що деякі пакети, сегментовані в буфері повторної передачі RLC AM, не можуть бути перекомпоновані як вихідний PDCP SDU. Тому вони загублені;

- Другий, який залежить від розміру буфера, полягає в тому, що під час хендвера цільовий буфер передачі RLC AM приймає як пакети, надіслані джерелом UDP зі швидкістю λ , так і пакети, що були у вихідних буферах RLC. Якщо вихідні буфери RLC заповнені, то цільовий буфер може переповнюватись та відкидати пакети.

Обидва ці явища підкреслюються тим, що процедура передачі займає більше часу, ніж процедура переключення. Дійсно, це включає 3 повідомлення на інтерфейсі X2 і повідомлення до базової мережі перед тим, як передача буде завершена на цільовому eNB. Більше того, поки UE не завершить процедуру

RA, не засновану на конкуренції, з цільовим eNB, пакети не можуть надсилатися в UE і повинні бути буферизовані на рівні RLC. Це погіршує поведінку переповнення буфера RLC. Натомість, при швидкому перемиканні, UE не потрібно виконувати довільний доступ, оскільки воно вже підключене, тому, як тільки пакети потрапляють до буфера eNB, який є ціллю комутатора, вони передаються в UE.

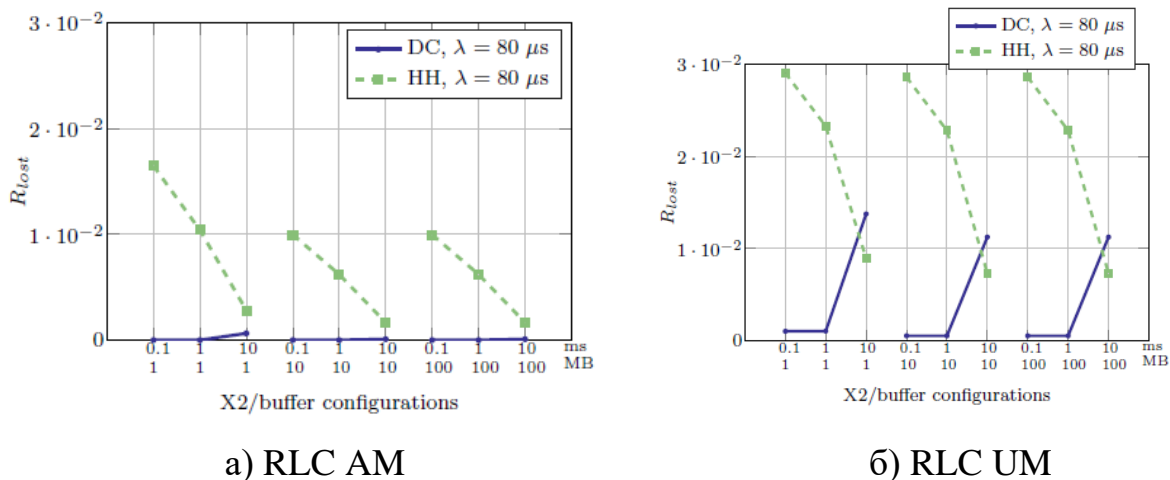


Рис. 3.15 Втрати пакетів UDP для швидкості UE $s = 2$ м/с, $\lambda = 80$ мс

На рис. 3.15а простежується тенденція до втрати для $s = 2$ м / с та $\lambda = 80$ мкс, і поведінку, яку щойно описали, можна детально побачити. Коли розмір буфера RLC AM BRLLC збільшується з 1 до 10 МБ, значення R_{lost} зменшується, але воно залишається постійним для 10 і 100 МБ. Також можна помітити, що втрати пакетів при встановленні жорсткого хендовера зменшуються із збільшенням затримки X2 DX2. Це можна пояснити тим фактом, що після завершення хендовера при більшій затримці X2 DX2 потрібно більше часу для запуску наступного хендовера, якщо канал раптово змінився під час попередньої передачі хендовера, тому буфери RLC мають менший шанс переповнення. Однак, оскільки оновлення на каналі повідомляється із затримкою DX2 в LTE eNB, і команда передачі повинна приймати ще один DX2

для прийому mmWave eNB, UE може бути підключений до eNB з низькою лінією SINR. Тому пакети в буфері не можуть бути передані (рівень передачі не видає можливості передачі) або передаються з помилками і потребують повторної передачі. Ось чому все ще існують втрати пакетів, а також погіршується продуктивність установки швидкого переключення.

Ця поведінка посилюється, коли використовується RLC UM, як показано на рис. 3.15b. Дійсно, оскільки немає повторних передач, втрати пакетів для рішення швидкої комутації з високою затримкою X2 вищі, ніж при жорсткому хендовері, що виграє від того, що відбувається менше хендоверів, таким чином буфери RLC скидаються менш часто. Для $DX2 \in \{0,1, 1\}$ мс, тобто для менш екстремальних затримок X2, швидке переключення працює краще, ніж жорсткий хендовер, також з RLC UM, і, як очікується, втрати пакетів вищі з RLC UM, ніж з RLC AM.

Затримка

Затримка L вимірюється для кожного пакета, з моменту, коли PDU PDCP входить в буфер RLC eNB, до моменту, коли він успішно прийнятий на рівні PDCP в UE. Отже, це затримка тільки правильно прийнятих пакетів.

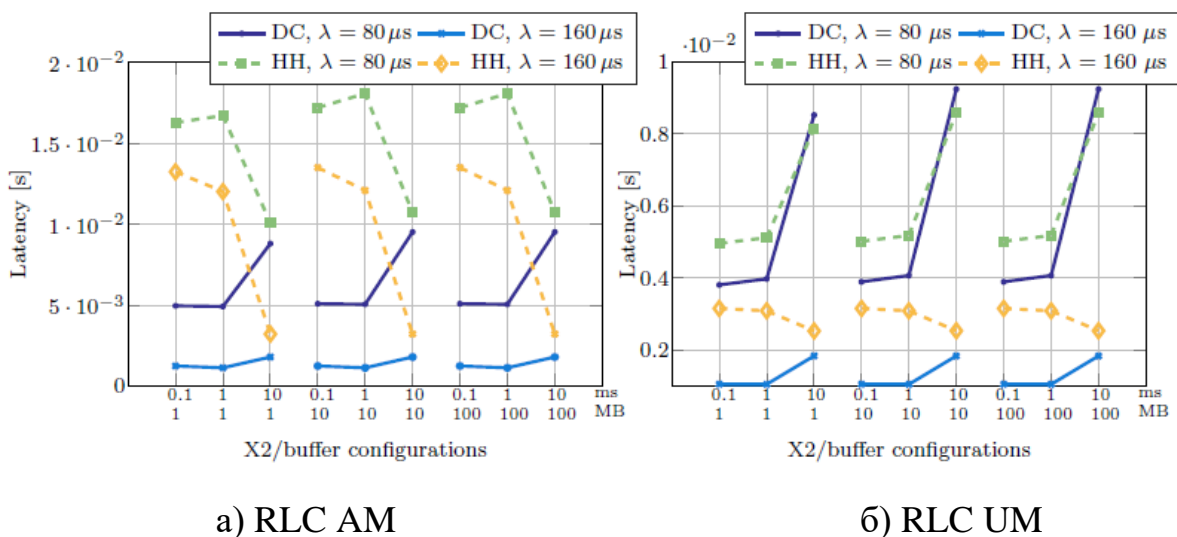


Рис. 3.16 Затримка L для різних DX2 і BRLC, швидкість UE $s = 2$ м / с

На рис. 3.16 показана середня затримка пакета по N моделювань для швидкості UE $s = 2$ м/с. Рисунок показує середній час очікування пакета для N моделювань для швидкості UE $s = 2$ м / с і різних значень затримки буфера і X2. Можна бачити, що швидке переключення перевершує жорстку передачу обслуговування, як з RLC AM, так і з UM, коли затримка X2 складає 0,1 або 1 мс. Однак для RLC AM затримка жорсткої передачі обслуговування зменшується для $DX2 = 10$ мс, в той час як швидке переключення трохи збільшується. Це пов'язано з тим, що для $DX2 = 10$ мс виконуються менш часті і більш тривалі хендовери, тому існує менша ймовірність того, що PDU RLC, вже знаходиться в буфері, пересилається між вихідним і цільовим eNB. Замість цього збільшення затримки швидкого перемикавання можна пояснити тим фактом, що, оскільки поновлення mmWave SINR повідомляються з більшою затримкою в LTE eNB, загальна продуктивність установки з подвійним підключенням стає гірше також з точки зору уявлення про втрати пакетів і пропускної здатності. Наприклад, UE може відчувати збій в каналі mmWave, але, з огляду на затримку X2, LTE eNB дізнається про це після $DX2 = 10$ мс. Протягом цього інтервалу UE може не приймати або може приймати з помилками пакети, відправлені з mmWave eNB, які потім повинні бути повторно передані, і це додатково збільшує затримку.

З RLC UM затримка менше, ніж з RLC AM, тому що повторні передачі не виконуються. Однак різниця між затримкою RLC AM і UM для швидкого перемикавання менше, ніж для жорсткого перемикавання, тобто час очікування жорсткого перемикавання з RLC UM зменшується більше, ніж час очікування для швидкого перемикавання. Зокрема, для $DX2 = 10$ мс і $\lambda = 80$ мкс час очікування жорсткого перемикавання трохи менше, ніж час швидкого перемикавання. Причини ті ж, що і для відповідної поведінки RLC AM.

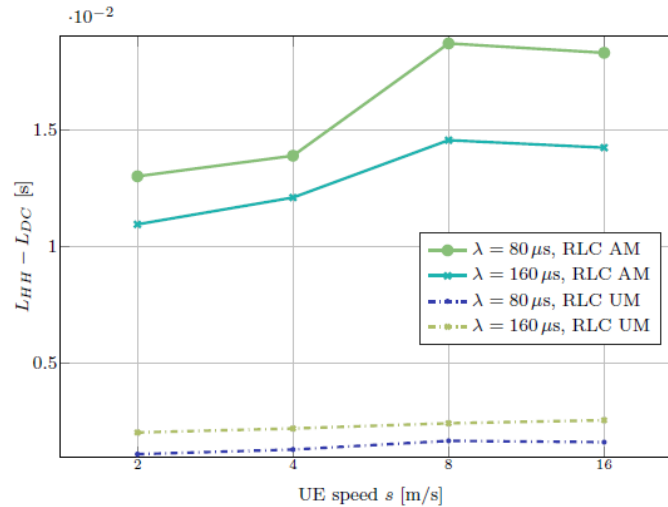


Рис. 3.17 Різниця між затримкою швидкого перемикування та жорсткого хендоверу, BRLC = 10 МБ, DX2 = 1 мс

На рис. 3.17 показана залежність від швидкості s UE. Зокрема, на графіку показано кількість:

$$L_{HH} - L_{DC} \quad (3.4)$$

тобто різниця в затримці між двома установками як функція швидкості UE для двох різних $\lambda \in \{80, 160\}$ мкс, BRLC = 10 МБ і DX2 = 1 мс. Можна бачити, що для RLC AM різниця, яка становить близько 10 мс, більше для більш високих λ . Більш того, різниця збільшується, коли швидкість UE збільшується з 2 до 8 м / с, як і очікувалося, але трохи зменшується при подальшому збільшенні швидкості s UE з 8 до 16 м / с. Однак зверніть увагу, що це затримка фактично отриманих пакетів, і втрати пакетів вище при $s = 16$ м / с. Така ж тенденція спостерігається і для RLC UM, але різниця майже на порядок менше і залежність від швидкості UE слабкіше.

Перше спостереження полягає в тому, що більшість пакетів (до 80% в деяких випадках) відправляються з дуже малою затримкою (близько 10-3,4 с, тобто менш ніж за мілісекунду). Фактично це затримка мережі радіодоступу mmWave, яка за задумом є тією, яку слід використовувати більшу частину часу,

оскільки вона повинна забезпечувати більш високу пропускну здатність. Тому середні значення, показані на малюнку 3.13, сильно відрізняються від середніх значень, які аналогічні для установок швидкого перемикавання і жорсткого перемикавання.

Друге спостереження полягає в тому, що для $DX2 = 0,1$ мс і $DX2 = 1$ мс опція швидкої комутації дозволяє відправити майже на 5 і 10% більше пакетів з затримкою інтерфейсу mmWave. Крім того, значення затримки, при якому функція CDF для швидкого перемикавання досягає 1, менше, ніж відповідне значення для жорсткого перемикавання.

Це пояснює, чому установка швидкого перемикавання має нижчу середню затримку. Причина такої поведінки полягає в тому, що перемикавання виконується набагато швидше, ніж передача обслуговування, тому UE відчуває:

- відсутність переривань обслуговування;
- канал mmWave з хорошим SINR (вище, ніж $\Delta L T E$) більшу частину часу, так що інтерфейс mmWave може обслуговувати більше пакетів без додаткових затримок. Це явище, навпаки, менш актуально для $DX2 = 10$ мс, і це пояснює, чому різниця у середніх значеннях менше.

Пропускна здатність PDCP

Пропускна здатність в часі на рівні PDCP вимірюється шляхом вибірки журналів прийнятих PDU PDCP кожні $T_s = 5$ мс і підсумовування розмірів прийнятих пакетів для отримання загальної кількості прийнятих байтів $B(t)$. Потім пропускна здатність $S(t)$ обчислюється в біт / с як:

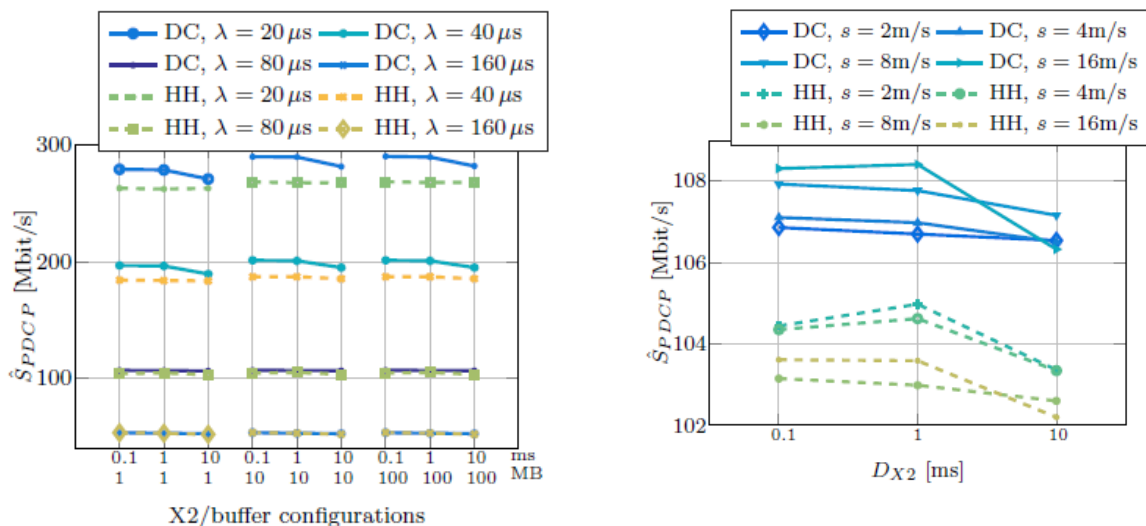
$$S_t = \frac{B(t) * 8}{T_s} \quad (3.5)$$

Потім, щоб отримати середню пропускну здатність SP DCP для моделювання, ці вибірки можуть бути усереднені за загальним часу моделювання і, нарешті, по N моделювання для отримання SP DCP.

Зверніть увагу, що пропускна здатність PDCP в основному складається з передачі нових вхідних пакетів, але вона також може враховувати повторну передачу вже переданих пакетів. Дійсно, в налаштуванні AM RLC, якщо пакет був переданий, але ще не підтверджений ACK, він зберігається в буфері повторної передачі AM RLC. Потім, коли відбувається передача обслуговування (перемикання), буфер повторної передачі пересилається в цільовій eNB (RAT) і передається знову. Отже, якщо в перший раз він був прийнятий успішно, він марно повторно передається.

Пропускна здатність PDCP в основному є мірою швидкості, яку може запропонувати радіомережа при певній швидкості додатка.

На рис. 3.18а показана пропускна здатність PDCP SP DCP для швидкості UE $s = 2$ м / с і різних комбінацій D_{X2} і BRLC. Можна помітити, що пропускна здатність, що досягається за допомогою рішення з подвійним підключенням з швидкою комутацією, вище, ніж з жорстким хендовером. Більш того, різниця в пропускній здатності збільшується в міру збільшення норми внесення відповідно до результатів по втратах пакетів.



а) \hat{S}_{PDCP} , швидкість UE $s = 2$ м/с, $\lambda \in \{20, 40, 80, 160\} \mu s$

б) \hat{S}_{PDCP} як функція від D_{X2} , для $\lambda = 80$ мс, $B_{RLC} = 10$ МБ і різних швидкостей UE s

Рис. 3.18 Пропускна здатність PDCP

Що стосується зв'язку зі швидкістю UE, існує різна поведінка по відношенню до жорсткої передачі обслуговування і настройки швидкого перемикавання. На рис. 3.18б показана пропускна здатність PDCP для різних швидкостей, різних DX2, $\lambda = 80$ мкс і BRLC = 10 МБ.

Пропускна здатність зазвичай зменшується при збільшенні DX2 з 1 до 10 мс. Причина та ж, що пояснює поведінку втрат пакетів: менше хендвера / перемикачів. Отже, при швидкому перемиканні, коли перемикавання на кращий канал відбувається за дуже короткий час, кількість непотрібних повторних передач зменшується в міру зменшення кількості перемикань. Те ж саме справедливо і для випадку передачі обслуговування, але оскільки переривання обслуговування триває довше і канал, який використовує UE, не є оптимальним протягом більш тривалого часу, виникає втрата в продуктивності також через неоптимального вибору каналу.

Варіант швидкого перемикавання на більш низькій швидкості викликає менше непотрібних повторних передач, тому пропускна здатність менше в порівнянні з пропускною спроможністю для більш високих швидкостей UE, за винятком $s = 16$ м / с і $DX2 = 10$ мс, де при збільшенні, обумовленого повторною передачею, також виникають втрати через комбінації швидшого UE і менш своєчасних оновлень оцінки SINR. Замість цього продуктивність передачі обслуговування знижується в міру збільшення швидкості UE.

RRC трафік

RRC-трафік вимірюється на рівні RLC шляхом аналізу журналів прийнятих RLC PDU і обліку тільки пакетів сигнальних радіоканалів. Тоді рівняння. (3.5) застосовується для отримання миттєвої пропускної здатності RRC, яка потім усереднюється за час моделювання.

Трафік RRC є показником того, скільки операцій управління виконується парами UE-eNB. Більш того, це залежить також від розміру PDU RRC.

Наприклад, повідомлення про перемиканні містить 1 байт для кожного односпрямованого каналу, який повинен бути переключено, в той час як повідомлення про реконфігурації RRC-з'єднання (яке запускає передачу обслуговування) переносить кілька структур даних, як мінімум 59 байтів для однієї реконфігурації односпрямованого каналу.

На рис. 3.19 показана пропускна здатність RRC для різних затримок D_{X2} і різних швидкостей UE. Зверніть увагу, що RRC-трафік не залежить від розміру BRLC буфера, оскільки навіть 1 МБ досить для буферизації RRC PDU і часу між прибуттям пакетів UDP, λ .

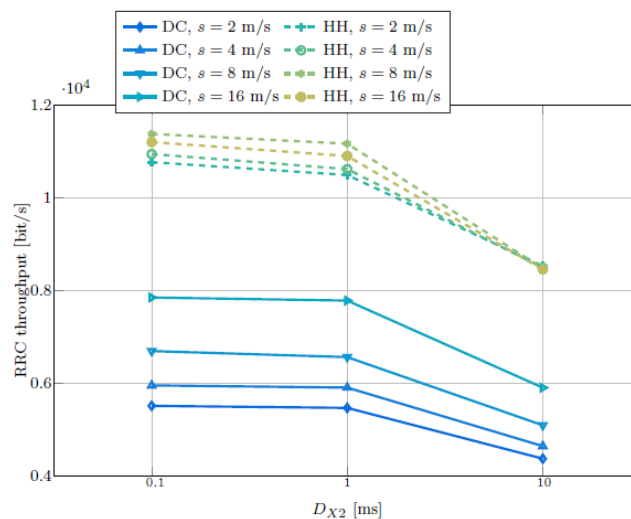


Рис. 3.19 Трафік RRC як функція швидкості UE і затримки $X2$

Можна бачити, що при швидкій комутації трафік RRC на 4-5 Кбіт / с нижче, ніж при жорсткій передачі обслуговування. Чим менше трафік RRC, тим краще, так як він дозволяє виділити більше ресурсів для передачі даних. Більш того, в цьому моделюванні враховується одне UE, але кількість пристроїв, які повинен обслуговувати eNB LTE або mmWave, може бути великою, тому трафік RRC може викликати великі накладні витрати.

Інші тенденції, які можна спостерігати:

- трафік RRC збільшується зі швидкістю UE. Ймовірно, це пов'язано з тим, що на більш високій швидкості потрібно більше повторних передач повідомлень. Більш того, на більш високих швидкостях канал змінюється частіше, тому виникає більше хендверів і перемикачів;

- трафік RRC трохи зменшується при збільшенні $DX2$ з 0,1 до 1 мс. Замість цього, коли $DX2 = 10$ мс, трафік RRC зменшується. Це показує, що при такій великій затримці $X2$ процедури передачі обслуговування і перемикачів тривають довше, тому передається менше повідомлень. Більш того, в разі жорсткого хендвера різниця між пропускною спроможністю RRC на різних швидкостях мінімізується, коли $DX2 = 10$ мс. Це пов'язано з тим, що при менш своєчасних оновленнях немає фактичної різниці між тим, як канал видно координатором для різних швидкостей UE.

X2 трафік

Ще одна метрика, яку необхідно враховувати при аналізі системи з подвійним підключенням, - це трафік каналу $X2$. Дійсно, якщо координатор розміщений в LTE eNB, канал $X2$ повинен підтримувати пересилання пакетів даних на віддалені RLC mmWave. Якщо замість цього він розміщений в базовій мережі, ті ж міркування, зроблені для каналу $X2$, будуть також дійсні для каналу, що з'єднує координатор з eNB LTE і mmWave.

У цьому моделюванні використовується тільки одне UE, тому не має сенсу показувати співвідношення, при якому використовуються посилання $X2$, оскільки це також залежить від конкретного вибору параметра даних для каналу $X2$. Замість цього обрана метрика:

$$X = \frac{S_{X2}}{S_{PDCP}} \quad (3.6)$$

де S_{PDCP} - пропускна здатність PDCP, як описано в рівнянні. (3.5), і

$$S_{X2} = \sum_{i=1}^3 S_{X2,i} \quad (3.7)$$

де $S_{X2,i}$ - середня пропускна здатність каналу X2 і за N ітерацій. У цій симуляції є 3 канали X2, по одному для кожного eNB mmWave до eNB LTE і одне між двома eNB mmWave.

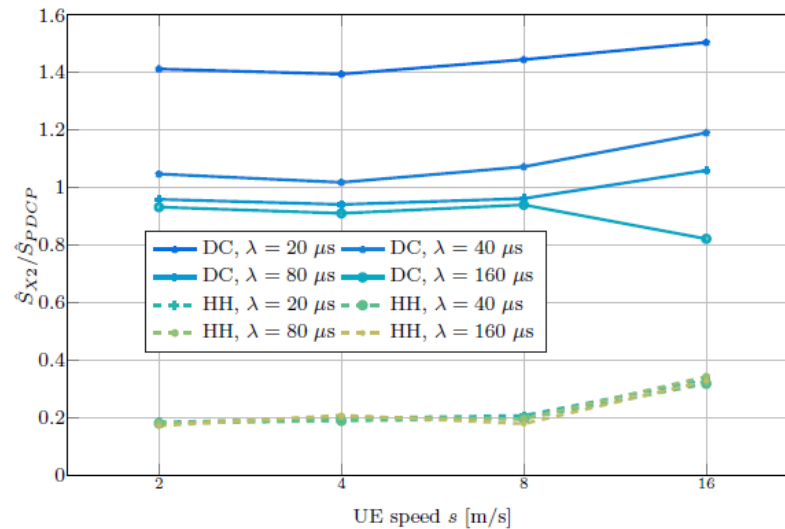


Рис. 3.20 Метрика X (див. рівняння (3.6)) для різних швидкостей UE s і λ , для $BRLC = 10$ МБ і $DX2 = 1$ мс

Цей показник спрямований на те, щоб показати, наскільки використовується канал X2 при певній пропускній здатності PDCP, тобто при заданій швидкості, з якою пакети даних відправляються по мережі радіодоступу. Це показано на рис. 3.20 для різних λ і різної швидкості s UE, а $BRLC = 10$ МБ, $DX2 = 1$ мс. Жорстке перемикання має коефіцієнт X, близький до 0,2, в цілому набагато менший, ніж коефіцієнт для швидкого перемикання, і не залежить від швидкості λ . Це означає, що при певній нормі внесення, яку повинна підтримувати система, канал X2 повинен бути розрахований так, щоб пропонувати тільки 20% від неї на одне UE. Також зверніть увагу, що в цьому

випадку відбувається багато передач обслуговування, тому це крайній сценарій щодо використання каналів X2.

Однак найцікавішим порівнянням є ставлення X рішення з швидким перемиканням, яке близьке до 1 для $\lambda \in \{40, 80, 160\}$ мкс. Це означає, що канали X2 повинні пересилати набагато більше пакетів даних, як очікувалося, і певний обсяг управляючої інформації, що пояснює, чому ставлення в деяких випадках більше 1. Для $\lambda = 20$ мкс, навпаки, ставлення X не дорівнює має сенс, оскільки швидкість, з якої пакети відправляються в RAN, вище, ніж швидкість, з якою вони пересилаються в UE, т. е. пакети досягають LTE eNB, перенаправляються в eNB mmWave, а потім або відкидаються (оскільки буфер передачі переповнюється), або не переданий успішно і переміщений в буфер повторної передачі.

Коментарі і подальший аналіз

Можна бачити, що в цілому варіант швидкого перемикання працює краще, ніж настройка жорсткого перемикання.

Основною перевагою швидкого налаштування перемикання є короткий час, необхідне для зміни мережі радіодоступу. Про це свідчать кілька показників. Затримка, як правило, менше для настройки швидкої комутації, тому що передача обслуговування є тривалою процедурою, і пакети повинні буферизованого в цільовому eNB перед їх відправкою. Коли буфер занадто малий (1 МБ), це також викликає переповнення буфера і втрату пакетів.

Швидке перемикання працює краще з більш низькими односторонніми затримками X2, в той час як здається, що жорсткий хендовер має більш високі затримки X2. Однак це залежить від того факту, що змодельований сценарій є екстремальним щодо якості каналу mmWave і кількості виконаних передач обслуговування, тому зменшення затримки і втрат пакетів викликає меншу кількість передач обслуговування, які виконуються в якості затримки X2.

збільшується. Це не означає, що мати більш високу затримку X2 краще: дійсно, пропускна здатність PDCP знижується через несвоєчасне поновлення якості каналу.

Виграш в продуктивності постійний також на різних швидкостях UE, тому рішення для швидкої комутації може бути хорошим кандидатом на стійкість до мобільності.

Ще одна перевага рішення з подвійним зв'язком полягає в тому, що сигналізація управління, що відноситься до користувальницької площини (тобто установка радіоканалів даних, перемикання), виконується в поєднанні LTE. Однак це може викликати збільшення трафіку LTE eNB, загальний RRC-трафік менше при використанні рішення з швидкою комутацією. Більш того, LTE eNB використовується для трафіку площини користувача тільки тоді, коли SINR всіх mmWave eNB менше, ніж Δ LT E, тому UE більшу частину часу використовують mmWave eNB. Це дозволяє LTE eNB обробляти навантаження набагато більшого числа UE, ніж він міг би керувати, якби площину користувача LTE завжди використовувалася.

Однак очікується, що обчислювальна навантаження на LTE eNB зросте, зокрема, якщо координатор суміщений з LTE eNB. Цей аспект не досліджувався при моделюванні, оскільки структура моделювання в ns - 3 НЕ моделює навантаження на ЦП або пам'ять. Однак eNB LTE повинен зібрати таблиці звітів і знайти оптимальну асоціацію mmWave для кожного UE, а також він повинен кодувати і відправляти повідомлення RRC на UE. Більш того, якщо координатор розташований в одному місці і оскільки PDCP шифрує PDU, які він приймає з більш високих рівнів, LTE eNB повинен шифрувати весь трафік UE з подвійним підключенням, що знаходяться під його покриттям. Отже, при розгортанні мереж 5G наступного покоління необхідно буде враховувати, чи оновлення обчислювальних елементів в eNB LTE.

Ще один недолік рішення для швидкої комутації з подвійним підключенням полягає в тому, що канали X2 сильно навантажені, і розгортання цього рішення має бути ретельно сплановано з урахуванням даних каналів X2, інакше вони можуть стати вузьким місцем системи.

Висновки

1. Запропоновано двохранімну архітектуру ядра мережі, яка зможе як надавати нові послуги та сервіси, так і підтримувати роботу пристроїв, що підключаються тільки до мереж LTE.

2. Детально розглянуто запропоновану архітектуру подвійного підключення для інтеграції LTE-5G на рівні PDCP. Описано загальні особливості та архітектурний вибір.

3. Досліджено особливості подвійного підключення, та його реалізації в симуляторі ns-3.

4. Детально описано реалізацію жорсткого хендоверу та хендоверу без втрат, а також процедури швидкого перемикавання.

5. Проведено симуляцію в ns-3, де були детально розглянуті такі параметри як: втрати пакетів, затримка, пропускна здатність PDCP, RRC трафік та інше. Після чого були зроблено загальний аналіз та висновки з проведеного моделювання.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У розділі проводиться аналіз стартап-проекту за темою даної роботи для визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

4.1. Опис ідеї стартап-проекту

У табл. 4.1 наведено зміст ідеї стартап-проекту, в межах якої потрібно шукати групи потенційних клієнтів, напрямки , де може бути реалізовано проект та вигоди для користувача. Визначимо потенційну цільову аудиторію проекту, спосіб його монетизації, основних конкурентів на ринку та конкурентну перевагу запропонованого продукту.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стратап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Розгортання мереж 5G в тісній взаємодії з LTE	Телекомунікаційні системи та мережі нового покоління	Висока швидкість передавання даних
		Доступність нових послуг та сервісів
		Можливість реєстрації в обох мережах та швидкого перемикання між мережами.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (відмінність від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2)

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) послуги/концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проект	Товар-аналог	Товар-аналог			
1	Призначення	Використання в мережах зв'язку	Використання в мережах зв'язку	Використання в невеликих мережах зв'язку			+
2	Надійності	Довговічність використання	Довговічність використання	Довговічність використання		+	
3	Технологічні	Збільшена надійність системи та швидкість хендоверу	Збільшена швидкість передачі даних	Збільшена пропускна здатність системи			+
4	Ергономічні	Система зрозуміла в користуванні та налаштуванні	Система зрозуміла в користуванні та налаштуванні	Система зрозуміла в користуванні та налаштуванні		+	
5	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

- технологія, за якою буде виготовлено товар згідно ідеї проекту;
- аналіз наявності такої технології;
- доступність технологій автору проекту.

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технологій
1	Математичне дослідження характеристики мережі	Програмне середовище Mathcad	+	–
2	Створення віртуальної моделі мережі	ns-3 simulator	+	+
3	Розроблення топології мережі	ns-3 simulator	+	+
Обрана технологія для аналізу та дослідження ідеї проекту: Програмне середовище ns-3 simulator				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу	Немає
4	Специфічні вимоги до стандартизації сертифікації	Немає
5	Середня норма рентабельності в галузі ринку, %	300

За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження. Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи наведено в табл.4.5. Проведено аналіз ринкового середовища: складені таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл.4.6-4.7). Фактори в таблицях подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до послуги
Висока швидкість передавання інформації	Системи мобільного зв'язку, радіозв'язку, телебачення	Поведінку клієнта Формують потреби; особливостей купівлі та експлуатації товару не має	Мережа має стабільно забезпечувати доступ в Інтернет

Таблиця 4.6

Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестача кваліфікованих кадрів	Для налаштування мережевого обладнання потрібна команда людей з відповідним рівнем знань	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2	Нестача ресурсів	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності мережі	Укладання угод з державними структурами для фінансування та надання можливостей для тестування мережі
3	Фінансова нестабільність	Потреба в коштах для забезпечення необхідного обладнання.	Пошук інвесторів

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Попит	Існування постійного попиту на зростання швидкості передавання даних означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій. Збільшення пристроїв, що підключаються до мережі Інтернет.	Рекламна діяльність, просування товару у Інтернеті, участь у формах та конференціях.
2	Науково технічний прогрес	Стрімкий ріст технологій та збільшення наукової бази дозволяють Ефективно вирішити Поставлені завдання	Ознайомлення з останніми патентами у відповідній галузі; відвідування наукових конференцій

Надалі проведено аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8). Після аналізу конкуренції проведений більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за М. Портером) (табл. 4.9). Сильні позиції компанії за кожним з факторів М. Портера означають і її можливості забезпечити необхідні темпи обороту капіталу та здатність впливати на інших агентів ринку, диктуючи їм власні умови співпраці. Характеристики факторів моделі відрізняються для різних галузей та змінюються із часом. На основі аналізу конкуренції, наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Тип конкуренції: монополія	На ринку в межах України існує 3 подібні компанії, але вони розгортають свою мережу за стандартами	Підвищувати якість послуги (досягати кращих показників) за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2	За рівнем конкурентної боротьби: державний	Компанії-конкуренти зо знаходяться в Україні, поки ще не надають використовувану технологію.	Створити веб-сайт компанії, що відповідатиме міжнародним стандартам
3	За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Економічна боротьба між надавачами послуг, які діють в одній галузі	Слідкувати за розвитком продукту конкурента

		економіки, виробляють і реалізують однакові послуги, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні	
4	Конкуренція за видами послуг: товарно-видова	Конкуренція між послугами одного виду	Покращувати рівень якості послуги
5	За характером конкурентних переваг: цінова	Передбачає продаж послуг за нижчими цінами ніж конкурент	Продавати послугу за помірною ціною
6	За інтенсивністю: марочна	В сучасній економічній ситуації боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама послуги, створення символіки продукту

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти
	Lifecell, Vodafone, Київстар	Немає	Немає	Вимоги до якості
Висновки	Інтенсивність конкурентної боротьби висока	Можливість виходу на ринок є	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Послуга має задовольняти вимоги клієнтів

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ступінь задоволення потреб користувача	Продукт має забезпечувати передавання даних зі швидкістю яка задовольняє користувача, та забезпечувати доступ до сервісів, потрібних користувачу
2	Сумісність з існуючими системами	Продукт не має створювати завад для інших систем радіозв'язку
3	Якість розробки з точки зору показників надійності	Продукт має забезпечувати достовірність переданих даних
4	Наявність кваліфікованих кадрів в команді	Науковці з досвідом та високим рівнем підготовки, які зацікавлені в дослідженні та розвитку методу 5G/LTE
5	Економічний	Ціна товару має бути помірною

На фінальному етапі ринкового аналізу можливостей впровадження проекту виконано SWOT-аналіз (матриця аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.11) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, сильних і слабких сторін/Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи

аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.11).

Таблиця 4.11

SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> 1. Економічна (ціна товару є помірною). 2. Ступінь задоволення потреб користувача. 3. Якість розробки з точки зору показників надійності
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нестача наукових та технічних ресурсів. 2. Присутність конкурентів на національному ринку 3. Популярність бренду. 4. Нестійка позиція на ринку.
Можливості	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зниження витрат на виробництво продукції. 2. Покращення якості продукту. 3. Формування попиту на товар за рахунок реклами. 4. Освоєння національного ринку. 5. Залучення нових клієнтів. 6. Розширення складу команди. 7. Нові технології
Загрози	<ol style="list-style-type: none"> 1. Несприятлива економічна ситуація в країні. 2. Додатковий державний контроль якості продукту. 3. Товари-аналоги.

Таблиця 4.12

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Пошук наукових та технічних ресурсів, пошук інвесторів, поглиблене дослідження, тестування, створення реклами.	70%	2 роки
2	Налагодження виробничого процесу, дослідження поведінки споживачів, пошук коштів, пошук наукових ресурсів, пошук обладнання, створення програмного забезпечення, тестування.	65%	3 роки

Із зазначених альтернатив обрано альтернативу № 1, так як для неї отримання ресурсів є більш ймовірним, а строки реалізації – більш стислими

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів, що наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні установи	Готові	Середній	Низька	Середня
2	Приватні підприємства	Готові	Високий	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №2.					

Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (табл. 4.14). Вибір стратегії конкурентної поведінки наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.14

Визначення базової стратегії розвитку

№	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Задоволення потреб обраного цільового сегменту	Формування попиту у користувачів за рахунок унікальних характеристик та високої якості товару	Стратегія спеціалізації

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики послуги конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Так	Ні	Стратегія лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап компанії) та до продукту (табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.14) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15) розроблено стратегію позиціонування, наведену в табл. 4.16. Стратегія позиціонування полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.16

Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до послуги цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Товар має забезпечувати швидкість передавання та відповідати вимогам надійності	Стратегія спеціалізації	Високий ступінь задоволення потреб користувача, гнучкість, нові технології та сервіси, помірною ціною	Оптимальне співвідношення ціна/якість, наукоємність, співпраця.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.17 наведені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.17

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Висока швидкість передавання даних	Висока швидкість передавання даних в мережі	Значно вища швидкість передавання даних
2	Якість	Стабільність роботи системи	Використання високоякісного обладнання

Розроблено трирівневу маркетингову модель товару: уточнена ідея продукту (та/або послуги), його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.18).

Таблиця 4.18

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні послуги	Сутність та складові		
I. Послуга за задумом	Розгортання мережі 5G		
II. Послуга у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/ Е/Ор
	1. Забезпечення високих швидкостей передавання даних. 2. Помірна ціна. 3. Забезпечення достовірності переданих повідомлень 4. Високий рівень надійності та стабільності мережі		
II. Послуга із підкріпленням	До продажу: гарантія		
	Після продажу: встановлення, налаштування, обслуговування, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності			

Наступним кроком визначено цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл.4.19). Аналіз проведено експертним методом.

Таблиця 4.19

Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	3000 - 5000 у.о	6000 у. о	Високий	7000 – 12000 у.о

Наступним кроком визначено оптимальну системи збуту, в межах якої приймається рішення (таблиця 4.20):

- збут власними силами або із залученням сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.21). Маркетингова комунікація охоплює будь-яку діяльність підприємства, спрямовану на інформування, переконання, нагадування споживачам та ринку в цілому про свої товари і свою діяльність.

Таблиця 4.20

Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник послуги	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Заказ послуги на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення налаштування, інформування, поділ, зберігання	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо пропонує продукцію покупцям

Таблиця 4.21

Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Використання послуги для передавання даних на високій швидкості. Використання у комерційних цілях	Прямі канали комунікації, в яких інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Висока швидкість передавання даних.	Поширення інформації про новий метод модуляції. Поширення знань про підприємство	Особлива увага приділяється високій швидкості передавання даних. Відмінність між послугою і послугами замінниками.

Висновки

1. За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження. Спостерігається попит на розгортання мереж 5G, що забезпечують високу швидкість передавання даних та нові сервіси. Можливість ринкової комерціалізації проекту присутня.

2. Продукт є унікальним в своїй галузі. Конкурентів на національному ринку мінімальна кількість. Для подальшого дослідження, розробки та тестування товару потрібно залучити висококваліфікованих науковців та інженерів.

3. Для ринкової реалізації проекту доцільно обрати альтернативу – пошук наукових та технічних ресурсів, залучення інвесторів, створення реклами, взаємодія зі споживачами

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У цій роботі представлений подвійний зв'язок з швидким перемиканням на рівні PDSP як архітектура тісної інтеграції LTE-5G, а також представлена оцінка продуктивності системи, що порівнює її з базовим жорстким хендвером між RAT.

В роботі було отримано такі теоретичні результати:

1. Було проілюстровано основні технології, які, як очікується, стануть частиною стандарту 5G, були описані основні проблеми зв'язку в міліметровому діапазоні.

2. Було розглянуто основні пропозиції щодо тісної інтеграції LTE-5G, а також сучасний стан стека мобільних протоколів LTE, подвійного підключення і процедур передачі обслуговування.

3. Представлені мережеві процедури і архітектура для інтеграції, а також обговорення їх реалізації в ns - 3. Детально були представлені необхідні керуючі сигнали і модифікації на рівні RRC, визначення мережевого пристрою з подвійним підключенням в симуляторі і реалізація передачі обслуговування між LTE і 5G.

4. Запропоновано використовувати архітектуру ядра яка включає в себе як функції EPC так і 5GC, що дозволить лише розширивши ядро EPC реєструвати пристрої в обох мережах, а також є наступним кроком при розгортанні повної мережі 5G.

5. Було визначено сценарій моделювання для порівняння швидкого перемикання і жорсткого хендверу, а також було проведено моделювання, яке дозволило описати продуктивність системи за допомогою декількох показників.

6. Було проаналізовано результати моделювання, які показали, що при відповідній затримці на інтерфейсі X2 рішення для швидкої комутації здатне забезпечити меншу затримку для передач RLC PDU. Більш того, воно гарантує

менші втрати пакетів і RRC-трафіку, так що знижуються накладні витрати, пов'язані з керуючим трафіком. З іншого боку, воно іноді виконує повторну передачу вже успішно переданих пакетів і вимагає мінімальної швидкості на інтерфейсах X2, порівнянної з сумою швидкостей UE, які mmWave eNB хоче підтримувати.

7. Було визначено, що варіант швидкої комутації краще, але його розгортання повинно бути ретельно продумано.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “Mobility Report - On The Pulse Of The Networked Society” [Електронний ресурс] // Ericsson – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ericsson.com/mobility-report>.
2. “Design considerations for a 5G network architecture”. // IEEE Communications Magazine. – №52. – С. 65–75.
3. Z. Pi та F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems”. // IEEE Communications Magazine. – №49. – С. 101–107.
4. M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, та E. Erkip, “Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation”. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – №32. – С. 1164–1179.
5. C. Han, T. Harrold, S. Armour, I. Krikidis, S. Videv, P. M. Grant, H. Haas, J. S. Thompson, I. Ku, C. X. Wang, T. A. Le, M. R. Nakhai, J. Zhang, and L. Hanzo, “Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks”. // IEEE Communications Magazine. – №49. – С. 46–54.
6. W. B. Abbas and M. Zorzi, “Towards an Appropriate Receiver Beamforming Scheme for Millimeter Wave Communication: A Power Consumption Based Comparison” [Електронний ресурс] // 22nd European Wireless Conference – Режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/1604.05151>.
7. T. S. Rappaport and J. N. Murdock, “Power efficiency and consumption factor analysis for broadband millimeter-wave cellular networks”. // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – С. 4518–4523.
8. LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker., 2009.
9. M. Mezzavilla, S. Dutta, M. Zhang, M. R. Akdeniz, and S. Rangan, “5G MmWave Module for the Ns-3 Network Simulator” [Електронний ресурс] //

Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://doi.acm.org/10.1145/2811587.2811619>.

10. “Lte Module Design.” [Электронный ресурс] // ns-3 – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html>.

11. S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges”. // Proceedings of the IEEE. – 2014. – №102. – С. 366–385.

12. D. Silva, G. Mildh, J. Rune, P. Wallentin, J. Vikberg, P. Schliwa-Bertling, and R. Fan, “Tight Integration of New 5G Air Interface and LTE to Fulfill 5G Requirements”. // 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). – 2015. – С. 1–5.

13. P. Rost, C. J. Bernardos, A. D. Domenico, M. D. Girolamo, M. Lalam, A. Maeder, D. Sabella, and D. Wbhen, “Cloud technologies for flexible 5G radio access networks”. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – №52. – С. 68–76.

14. K. Mallinson, “The path to 5G: as much evolution as revolution.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1774-5g-wiseharbour>.

15. METIS project, “Final Report on Architecture, Deliverable D6.4, 2015.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D6.4_v2.pdf.

16. F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G”. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – №52. – С. 74–80.

17. C. L. I, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, “Toward green and soft: a 5G perspective”. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – №52. – С. 66–73.

18. T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas”. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2010. – №9. – С. 3590–3600.

19. METIS-II, “Draft air interface harmonization and user plane design.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/METIS-II D4.1 V1.0.pdf>.

20. S. Hong, J. Brand, J. I. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, and P. Levis, “Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond”. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – №52. – С. 114–121.

21. N. Nikaiein, E. Schiller, R. Favraud, K. Katsalis, D. Stavropoulos, I. Alyafawi, Z. Zhao, T. Braun, and T. Korakis, “Network Store: Exploring Slicing in Future 5G Networks” [Электронный ресурс] // Proceedings of the 10th International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2795381.2795390>.

22. S. Nie, G. R. MacCartney, S. Sun, and T. S. Rappaport, “28 GHz and 73 GHz signal outage study for millimeter wave cellular and backhaul communications”. // 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2014. – С. 4856–4861.

23. J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta, and R. W. Heath, “Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems” [Электронный ресурс] // CoRR. – 2016. – Режим доступа до ресурсу:]. Available: <http://arxiv.org/abs/1605.04283>.

24. IEEE, “802.11ad-2012 - IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band,” 2014.

25. H. Shokri-Ghadikolaie, C. Fischione, G. Fodor, P. Popovski, and M. Zorzi, “Millimeter wave cellular networks: A mac layer perspective”. // IEEE Transactions on Communications. – 2015. – №63. – С. 3437–3458.
26. Q. C. Li, H. Niu, G. Wu, and R. Q. Hu, “Anchor-booster based heterogeneous networks with mmwave capable booster cells”. // 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). – 2013. – С. 93–98.
27. Kinetic Study on the Leaching of Pt, Pd and Rh from Automotive Catalyst Residue by Using Chloride Solutions / [Y. Cao, H. Sri, A. Shibayama та ін.]. // The Mining and Materials Processing Institute of Japan. – 2006. – №47. – С. 2015–2024.
28. W. B. Abbas and M. Zorzi, “Context Information Based Initial Cell Search for Millimeter Wave 5G Cellular Networks” [Электронний ресурс] // 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/1605.01930>.
29. C. Y. Chen and J. Wu, “A 12b 3GS/s pipeline ADC with 500mW and 0.4 mm² in 40nm digital CMOS”. // IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSIC). – 2011. – С. 120–121.
30. G. Berardinelli, K. I. Pedersen, F. Frederiksen, and P. E. Mogensen, “On the design of a Radio Numerology for 5G Wide Area”. // The Eleventh International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2015). – 2015. – С. 13–18.
31. 3GPP Technical Specification 36.321, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification.” [Электронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.3gpp.org.
32. 3GPP Technical Specification 36.323, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Specification.” [Электронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.3gpp.org.

33. 3GPP Technical Specification 36.331, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: www.3gpp.org.

34. J. F. Monserrat, H. Droste, O. Bulakci, J. Eichinger, O. Queseth, M. Stamatelatos, H. Tullberg, V. Venkatkumar, G. Zimmermann, U. Dtsch, and A. Osseiran, “Rethinking the mobile and wireless network architecture: The METIS research into 5G”. – 2014. – №2014. – С. 1–5.

35. 3GPP Technical Report 36.808, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Carrier Aggregation; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 10).” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: www.3gpp.org.

36. C. J. Bernardos, A. de la Oliva, P. Serrano, A. Banchs, L. M. Contreras, H. Jin, and J. C. Zuniga, “An architecture for software defined wireless networking”. // IEEE Wireless Communications. – 2014. – №3. – С. 52–61.

37. 3GPP, “Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies,” 2016.

38. 3GPP Technical Report 36.842, “Study on Small Cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN; Higher layer aspects.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: www.3gpp.org.

39. 3GPP Technical Specification 36.133, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management .” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: www.3gpp.org.

40. ns-3 Consortium, “What is ns-3.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>.

41. N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, “An Open Source Product-oriented LTE Network Simulator Based on Ns- 3” [Электронный ресурс] // Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling,

Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <http://doi.acm.org/10.1145/2068897.2068948>.

42. ns-3, “Buildings Module Design.” [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/buildings-design.html>.

43. M. Zhang, M. Mezzavilla, R. Ford, S. Rangan, S. S. Panwar, E. Mellios, D. Kong, A. R. Nix, and M. Zorzi, “Transport Layer Performance in 5G mmWave Cellular” [Электронный ресурс] // 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/1603.02701>.

44. M. Mezzavilla, M. Miozzo, M. Rossi, N. Baldo, and M. Zorzi, “A Lightweight and Accurate Link Abstraction Model for the Simulation of LTE Networks in Ns-3,” [Электронный ресурс] // Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <http://doi.acm.org/10.1145/2387238.2387250>.

45. Z. Pi and F. Khan, “System design and network architecture for a millimeter-wave mobile broadband (MMB) system”. // Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE. – 2011. – С. 1–6.

46. Ghosh, T. A. Thomas, M. C. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. W. Vook, T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, S. Sun, and S. Nie, “Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks”. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2014. – №1152. – С. 2014.

47. S. Dutta, M. Mezzavilla, R. Ford, M. Zhang, S. Rangan, and M. Zorzi, “Frame structure design and analysis for millimeter wave cellular systems” [Электронный ресурс] // IEEE Transaction on Wireless Communications – Режим доступа до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/1512.05691>.

48. M. Giordani, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Multi-Connectivity in 5G mmWave Cellular Networks”. // Proceedings of the 15th Annual Mediterranean Ad Hoc networking workshop. – 2016.

49. B. Nguyen, A. Banerjee, V. Gopalakrishnan, S. Kasera, S. Lee, A. Shaikh, and J. Van der Merwe, “Towards Understanding TCP Performance on LTE/EPC Mobile Networks” [Электронный ресурс] // Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, and Challenges. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://doi.acm.org/10.1145/2627585.2627594>.

50. Next Generation Mobile Networks Alliance, “Optimised backhaul requirements,” 2008.

51. H. Jiang, Z. Liu, Y. Wang, K. Lee, and I. Rhee, “Understanding bufferbloat in cellular networks” [Электронный ресурс] // Proceedings of the 2012 ACM SIGCOMM Workshop on Cellular Networks: Operations, Challenges, and Future Design. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: : <http://doi.acm.org/10.1145/2342468.2342470>.